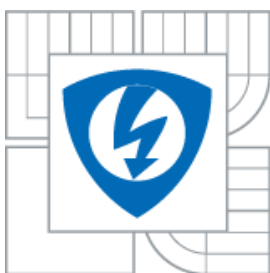




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PERSPEKTIVNÍ MATERIÁLY PRO POUZDŘENÍ

PERSPECTIVE MATERIALS FOR PACKAGING

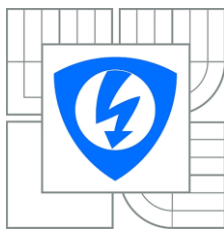
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN GANČEV

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Jan Gančev
Ročník: 3

ID: 146822
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Perspektivní materiály pro pouzdrění

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti materiálů pro pouzdrění elektronických obvodů. Zaměřte se na perspektivní materiály použitelné pro pouzdrění polovodičových čipů a hybridních integrovaných obvodů a definujte parametry pro jejich hodnocení. Proveďte teplotní analýzu vybraného typu pouzdra s pomocí programu ANSYS.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů, VUT IUM, 2006

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

V první části se práce zabývá teorií pouzdření polovodičových čipů a hybridních integrovaných obvodů a definováním materiálových vlastností stěžejních pro pouzdření. V druhé, experimentální, části jsou definovány základní principy přenosu tepla a u vybraného typu pouzdra je pomocí termočlánku, termokamery a tepelné simulace ověřen odvod tepla skrze vytvořené pouzdro. V poslední části je na základě srovnání dosažených výsledků navrženo zlepšení tepelného odvodu.

KLÍČOVÁ SLOVA

ANSYS® Workbench™, tepelný management, tepelná vodivost, teplotní simulace, termoplasty, pouzdření

ABSTRACT

The first part of work deals with the theory of packaging of semiconductor chips and hybrid integrated circuits and defining material properties essential to the packaging. In the second, experimental part are defined the basic principles of heat transfer and heat dissipation of created package using thermocouple, thermal camera and static-thermal simulation. In the last part there is created design recommendations for package based on the comparison of the results.

KEYWORDS

ANSYS® Workbench™, thermal management, thermal conductivity, thermal simulation, thermoplastics, packaging

GANČEV, J. *Perspektivní materiály pro pouzdření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2014. 63 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Perspektivní materiály pro pouzdření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále patří velký dík Ing. Boleslavu Psotovi a Ing. Jakubu Somerovi za jejich cenné rady a odbornou pomoc.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod.....	11
1 Funkce pouzdra	12
2 Rozdělení pouzder	12
2.1 Hermetická pouzdra	13
2.2 Nehermetická pouzdra	13
2.3 „Skoro-hermetická pouzdra“ (Near-hermetic package).....	14
2.4 Kovová pouzdra	14
2.4.1 Materiály pro kovová pouzdra	15
2.5 Keramická pouzdra	15
2.5.1 Materiály pro keramická pouzdra	16
2.6 Plastová pouzdra	17
2.6.1 Materiály pro plastová pouzdra	18
2.6.2 Tabulkový přehled pouzdřících hmot a jejich vlastností	20
3 Postup při výběru materiálu pouzdra.....	21
3.1 Výrobní požadavky na materiál	22
3.2 Technologické požadavky na materiál	22
4 Faktory ovlivňující návrh pouzdra	22
4.1 Elektrické vlastnosti.....	23
4.2 Tepelné a termomechanické vlastnosti	26
4.3 Mechanické vlastnosti.....	29
4.4 Chemické vlastnosti	31
4.5 Další vlastnosti.....	33
4.6 Přednostní nároky	34
5 Teplotní management	35
5.1 Přenos tepla kondukcí	35
5.2 Přenos tepla konvekcí	36
5.3 Přenos tepla radiací	38
6 Experimentální část	39
6.1 Návrh topného meandru.....	39
6.2 Měření teploty pomocí termočlánku	41
6.3 Zapouzdrění	43
6.4 Měření teplotního rozložení termokamerou.....	44
7 Modelování vlastností pouzder.....	45
7.1 Metoda konečných prvků.....	46
7.2 Simulace.....	46
7.2.1 Vyhodnocení teplotní analýzy pro meandr_1	49

7.2.2	Vyhodnocení teplotní analýzy pro meandr_2.....	52
8	Shrnutí výsledků.....	55
8.1	Tabulkové srovnání teplot.....	55
8.2	Grafické srovnání rozložení tepla	56
8.3	Porovnání simulací a měření.....	57
9	Návrh vylepšení.....	57
10	Závěr.....	60
	Seznam zkratk	61
	Použitá literatura a další zdroje.....	62
	Přílohy.....	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Pouzdro DIL [7]	13
Obrázek 2 - Kovové pouzdro TO-3 [13]	14
Obrázek 3 - Keramické pouzdro CBGA od firmy Amkor [13]	16
Obrázek 4 - Plastové pouzdro PBGA od firmy Amkor [13]	17
Obrázek 5 - Zakápnutý IO silikonovou pouzdřicí směsí [10]	19
Obrázek 6 - Rozložení meandrů na substrátu	40
Obrázek 7 – Meandry po vypálení	40
Obrázek 8 – Termočlánek OMEGA TC-08	41
Obrázek 9 - Uchycení vývodu termočlánu pomocí polyimidové lepicí pásky	41
Obrázek 10 - Pouzdřicí hlavice Bühnen - HB 500HT	43
Obrázek 11 – Forma pro pouzdro	43
Obrázek 13 - Zapouzdřený meandr_1 spodní pohled	43
Obrázek 12 - Zapouzdřený meandr_1 horní pohled	43
Obrázek 15 - Zapouzdřený meandr_2 spodní pohled	44
Obrázek 14 - Zapouzdřený meandr_2 horní pohled	44
Obrázek 16 - Termokamera EasIR™-9	44
Obrázek 17 - Rozložení teploty vzorku 2	45
Obrázek 18 - Rozložení teploty vzorku 12	45
Obrázek 19 - Rozložení teploty vzorku 3'	45
Obrázek 20 - Rozložení teploty vzorku 6'	45
Obrázek 21 - Počítačový model meandru_1	46
Obrázek 22 - Počítačový model meandru_2	46
Obrázek 23 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, horní pohled, polyamid	49
Obrázek 24 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, spodní pohled, polyamid	49
Obrázek 25 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, horní pohled, PTFE	50
Obrázek 26 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, spodní pohled, PTFE	50
Obrázek 27 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, horní pohled, PVC	51
Obrázek 28 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, spodní pohled, PVC	51
Obrázek 29 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, horní pohled, polyamid	52
Obrázek 30 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, spodní pohled, polyamid	52
Obrázek 31 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, horní pohled, PTFE	53
Obrázek 32 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, spodní pohled, PTFE	53
Obrázek 33 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, horní pohled, PVC	54
Obrázek 34 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, spodní pohled, PVC	54
Obrázek 35 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_1, horní pohled, PPS	57
Obrázek 36 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_1, spodní pohled, PPS	58

Obrázek 37 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_2, horní pohled, PPS.....	58
Obrázek 38 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_2, spodní pohled, PPS	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Termoplasty vhodné pro pouzdrění [3]	18
Tabulka 2 - Epoxidové pouzdrící hmoty společnosti EPO-TEK [1]	20
Tabulka 3 – Silikonové pouzdrící hmoty společnosti Polymer Systems Technology [1]	20
Tabulka 4 - Teplota skelného přechodu vybraných materiálů [11]	27
Tabulka 5 - Tepelná vodivost a objemová rezistivita vybraných materiálů [11]	28
Tabulka 6 - Hodnoty koeficientů C a n v závislosti na součinu $Gr \cdot Pr$ [14]	37
Tabulka 7 - Hodnoty součinitele přestupu tepla dle [4].....	38
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty odporů vypálených vzorků.....	40
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty pro meandr_1	42
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty pro meandr_2	42
Tabulka 11 - Tepelné vodivosti použitých materiálů	48
Tabulka 12 - Srovnání měření a simulací pro zapouzdrěný meandr_1	49
Tabulka 13 - Srovnání hodnot pro různé pouzdrící hmoty meandru_1	51
Tabulka 14 - Srovnání měření a simulací pro zapouzdrěný meandr_2	52
Tabulka 15 - Srovnání hodnot pro různé pouzdrící hmoty meandru_2	54
Tabulka 16 - Srovnání teplot pouzdrících hmot s návrhem vylepšení pro meandr_1 .	58
Tabulka 17 - Srovnání teplot pouzdrících hmot s návrhem vylepšení pro meandr_2 .	59
Tabulka 18 - Fyzikální charakteristiky vzduchu v závislosti na teplotě při konstantním tlaku 100 kPa dle [14].....	64

Úvod

Elektronické součástky a obvody procházejí v dnešní době neustálým kvalitativním a kvantitativním vývojem, který je ruku v ruce spojen se vznikem nových poznatků a také nových řešení a konstrukčních uspořádání [17]. Hlavním trendem ve vývoji elektronických obvodů je miniaturizace a současně také čím dál vyšší integrace součástek na substrátu. To je možné díky vývoji a vzniku nových technologií a materiálů, jež v sobě spojují chemické a fyzikální zákonitosti. Jedním z faktorů, který ovlivňuje podobu nových výrobků, je i sám člověk.

Uplatnění dnes nachází elektronika téměř ve všech průmyslových odvětvích, ať už je to spotřební průmysl, doprava (automobilová i letecká), dále zdravotnictví, potravinářství, zemědělství a mnoho dalších odvětví, nevyjímaje ochranu životního prostředí. Různorodost použití klade rozdílné požadavky na jejich spolehlivost a cenu, což přímo ovlivňuje konstrukci a provedení každého konkrétního elektronického obvodu či systému. Řešení každého elektronického systému proto bezprostředně souvisí, vzhledem k již zmíněné neustále rostoucí hustotě integrace součástek a příslušné oblasti aplikace, se způsobem pouzdření, jehož význam se oproti původnímu poslání zaměřenému na ochranu součástek podstatně rozšířil, neboť pouzdro musí zajistit také řadu dalších funkcí, jako např. nezkreslené vedení signálu, odvod tepla atd. [18].

Vývoj počtu tranzistorů na čipu předpověděl již v roce 1965 jeden ze zakladatelů Intelu Gordon Moore svým tvrzením, že počet tranzistorů na čipu se bude každých 24 měsíců zdvojnásobovat. Tento předpoklad je plněn díky vývoji litografických metod, jež určují rozlišení, neboli vzdálenost vodič-mezera, při realizaci tranzistoru na křemíku. Od roku 1971 do roku 2007, kdy se začala uplatňovat extrémní UV litografie, se snížila hodnota rozlišení z původních 10 μm dosahovaných v 70-tých letech na 32 nm a v dnešní době špičkoví výrobci procesorů pracují již s rozlišením 22 nm a dokonce ve vývojové fázi s 16 nm. Přitom současně počet tranzistorů na čipu vzrostl na řádově miliardy, což podstatně navýšilo pracovní kmitočet ze stovek kHz až na desítky GHz. Dále je charakteristický nárůst počtu vývodů u složitějších obvodů (např. mikroprocesorů) z několika desítek na stovky a více. Maximální ztrátový výkon s rostoucí pracovní frekvencí samozřejmě roste také, což s sebou přináší nárůst tepla, které čip produkuje, a které je nutné odvést. S tím vším a s mnoha dalšími faktory musí správný elektrotechnický inženýr při návrhu pouzdra počítat [9][18].

Z těchto důvodů se práce se zabývá kromě definování důležitých materiálových vlastností z hlediska pouzdření polovodičových čipů a hybridních integrovaných obvodů také ověřením teplotních vlastností na navrhnutém a zkonstruovaném typu pouzdra, včetně porovnání naměřených výsledků s výsledky simulací uskutečněných za pomoci programu ANSYS® Workbench™.

1 Funkce pouzdra

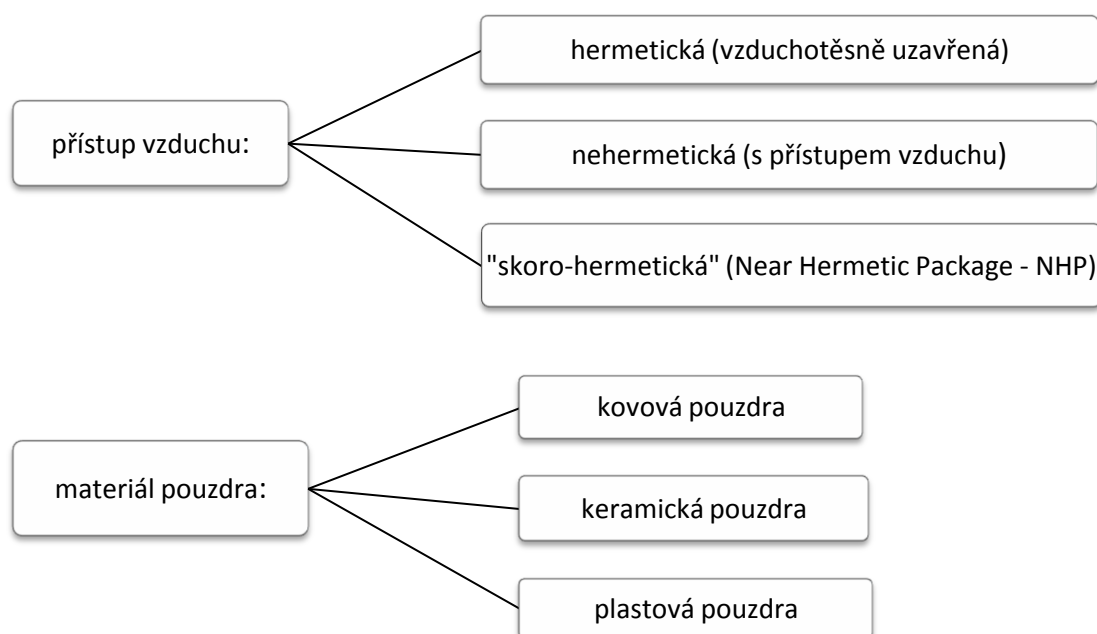
Zapouzdrazení nebo zalévání elektronické součástky nebo funkčního bloku se používá k zlepšení mechanické odolnosti, poskytuje elektrickou izolaci a přispívá ke zlepšení přenosu tepla, což je důležité z hlediska chlazení. Zapouzdrazení také slouží k utěsnění celé sestavy [6] [20].

Mezi základní funkce, které by mělo pouzdro zajišťovat, patří tedy především:

- ochrana čipu před vlivy okolního prostředí
- odvod tepla
- zajištění signálových a napájecích cest
- a propojení čipu se systémem

2 Rozdělení pouzder

Pouzdra můžeme rozdělit na základě dvou hledisek, na základě použitého materiálu pouzdra a jeho utěsnění:



2.1 Hermetická pouzdra

Pouzdro se považuje za hermetické, pokud vykazuje minimální úbytek plynu, neboli minimální množství plynu, které může difundovat do nebo z pouzdra do okolí.

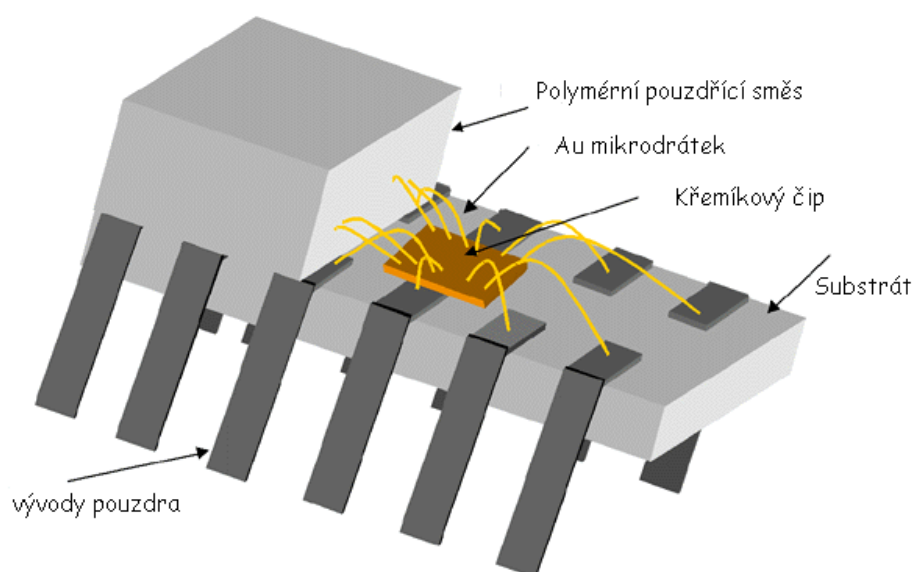
První hermeticky uzavřené pouzdro vzniklo kolem roku 1800. U katodové trubice (Cathode Ray Tube – CRT) se použilo skleněné pouzdro k utěsnění atmosféry a udržení vakua. Hermetické uzavření nacházelo uplatnění ještě později s objevem elektroniky. V dnešní době existuje pouze pár systémů, které vyžadují ke své funkci vakuum. Místo skleněných materiálů se využívá keramika a kov [3].

Hermetická pouzdra nachází uplatnění především ve vojenské, letecké, lékařské technice a částečně i v automobilovém průmyslu pro svoji větší spolehlivost. Tyto pouzdra jsou odolná proti vlhkosti a jiným vnějším chemickým vlivům. Jsou vhodná pro výkonové aplikace, kde se vyskytují obtíže s odvodem tepla [17].

2.2 Nehermetická pouzdra

Nehermetická pouzdra jsou z většiny případů vyrobena z plastových materiálů. Se zavedením DIL pouzdra (Dual-in-line package, viz obrázek 1) se začalo hromadně využívat plastových pouzder, ačkoli se plastů využívalo již dříve při výrobě diskretních tranzistorů. Integrovaný obvod (dále jen IO) je obvykle připevněn k vývodům pouzdra (tzv. leadframe), pomocí např. mikrodrátku, a následně zapouzdřen polymerní směsí [3].

Tato směs se obvykle skládá z epoxidových pryskyřic, tužidel, plniv a dalších přísad, které se lehce zkapalní mírným ohřevem, a vytvarují se do požadovaného tvaru, jenž následným ochlazením vytvoří s nosnou konstrukcí pevné spojení. Tohoto principu můžeme využít i u BGA (Ball Grid Array) pouzder, kde jako nosnou část obvodu použijeme organický substrát (např. FR-4).



Obrázek 1 - Pouzdro DIL [8]

2.3 „Skoro-hermetická pouzdra“ (Near-hermetic package)

K zapouzdření součástek máme zatím k dispozici dva extrémní případy, nákladné hermetické pouzdro a ekonomické nehermetické zapouzdření. Za jakýsi mezistupeň by mohlo být považováno právě NHP. Sice ještě neexistuje definice, ale design tohoto pouzdra by se dal považovat za „*good enough & cheap enough*“, tedy z hlediska spolehlivosti a funkce za dostačující a z hlediska finančního za levné řešení zapouzdření IO. Něco jako hermetické pouzdro s omezenými výrobními náklady. Stačí říci, že NHP by mělo zajišťovat dostatečnou bariéru a ochranu, aby zapouzdřený obvod splňoval zákaznickovy kritéria na výkon a spolehlivost [3].

2.4 Kovová pouzdra

Kovová pouzdra představují dokonalou bariéru proti vniknutí vlhkosti a plynů, proto jsou vhodná pro náročnější aplikace. Jsou hermeticky uzavřená, skládají se ze dvou částí, základny s vývody a z víčka. K jejich spojení se používá svařování.

Ačkoli surové kovy mohou být poměrně levné, výrobní procesy, využívané při výrobě těchto pouzder, značně navýší celkovou cenu pouzdra. V současné době nachází kovy a jejich kompozity uplatnění jako elektrické vodiče, pouzdra a jako propoje na desce plošných spojů (tzv. prokovy). Kovová pouzdra se využívají především pro aplikace s malým počtem vývodů a kde je nutné dokonalé elektromagnetické stínění [3][17].



Obrázek 2 - Kovové pouzdro TO-3 [15]

2.4.1 Materiály pro kovová pouzdra

Nejrozšířenějším materiálem pro kovová pouzdra, speciálně víčka, je kovar:

- jedná se o kovovou slitinu (54% Fe, 29% Ni, 17% Co)
- **výhody:** CTE kovu se shoduje s většinou CTE těsnících skel
- **nevýhody:** kovar neodvádí dostatek tepla, není vhodný pro vysokovýkonné obvody

V tom případě je lepší použít slitinu mědi:

- **výhody:** vysoká tepelná vodivost, např. slitina Cu-W má $\lambda=209,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ oproti kovaru s $\lambda=15,5 - 17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
- **nevýhody:** je obtížné utěsnit víčko, vzniká velké tepelné namáhání vlivem rozdílných hodnot CTE mědi a těsnícího skla

Levnou variantou, která nabízí snadné svařování je ocel válcovaná za studena (CSR – Cold Rolled Steel). Nevýhodou je vyšší náchylnost ke korozi [11].

2.5 Keramická pouzdra

Keramika je stále oblíbeným materiálem, jak pro hermetická, tak i nehermetická pouzdra, která vyžadují následující parametry:

- dobrou rovinnost
- hladkost povrchu
- extrémní mechanickou stabilitu
- vysokou tepelnou vodivost
- vynikající teplotní stabilitu

Keramika má výhodu vysoké elektrické rezistivity ($\sim 10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$), což dává pouzdrům vynikající izolační vlastnosti. Keramické materiály a procesy jsou i nadále dražší než organické technologie, i když se stále pracuje na snižování nákladů spojených s procesy výroby keramických pouzder. Keramika je v současné době oblíbenou platformou pro velké procesory a vysokofrekvenční zařízení, ale pokud je to možné, tak je nahrazována plastovými materiály, které jsou levnější a jejich výrobní procesy jsou jednodušší [3].



Obrázek 3 - Keramické pouzdro CBGA od firmy Amkor [15]

Vývodové keramické nosiče čipů se zpravidla dodávají s otevřenou dutinou (kavitou) pro vložení čipu. Pouzdro se skládá ze dvou částí, nosného korpusu s vývody (tvoří substrát) a z víčka (může být keramické nebo kovové). Právě tato víčka zajišťují hermetičnost uzavření, jsou lepena epoxidem, pájena, nebo připojena skelnou fritou [11] [17].

2.5.1 Materiály pro keramická pouzdra

Nejčastějším materiálem pro keramická pouzdra je oxid hlinitý (Al_2O_3), 90% až 99%, zbytek tvoří oxid křemičitý, hořečnatý nebo vápenatý. Oxid hlinitý má oproti slitině Cu-W horší tepelnou vodivost ($\lambda=15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$), proto nemůže být použit u vysokovýkonných aplikací. V tom případě se používá oxid beryllia (BeO), nitrid hliníku (AlN) nebo karbid křemíku (SiC). Ačkoli má BeO vysokou tepelnou vodivost ($\lambda=150\text{-}300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$), je v práškové formě toxický a jsou zapotřebí speciální opatření pro zachování bezpečnosti pracovníků během procesu. Navíc je asi 10x dražší než Al_2O_3 a má horší CTE shodnost s křemíkem. Alternativou je AlN s vysokou tepelnou vodivostí ($\lambda=170\text{-}260 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) a s CTE skoro shodným s křemíkem.

Další kategorií materiálů pro pouzdra je kovový matricový kompozit (MMC – metal matrix composite). Jedná se o kovový materiál vyztužený keramickými částicemi. Tyto materiály jsou lehké, s CTE podobným materiálům používaným při pouzdření (záleží na % obsahu keramických částic v kompozitu) a teplotní vodivostí srovnatelnou s kovy ($\sim \lambda=160 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) [11].

2.6 Plastová pouzdra

Plastová pouzdra, založená především na termosetových¹ materiálech, tvoří přibližně 95% světového trhu s pouzdry a jsou nejrozšířenější pro spotřební aplikace, proto jim bude věnována větší pozornost. Hlavním důvodem je jejich nízká cena (0,1 až 0,5 ceny kovového nebo keramického pouzdra), všestrannost a snadnější automatizace. Existuje i pár nevýhod. Běžné polymerní pouzdřicí směsi mají omezenou skladovací životnost, musí se udržovat v chladu, pro co nejdelší životnost, a během zpracování se můžou lišit jejich vlastnosti v závislosti na stáří a teplotní historii směsi. Jakmile se termosety jednou vytvrdí, tak se nedají roztavit a znova použít [3].

Epoxidové směsi jsou obecně klasifikovány jako nebezpečný odpad, protože mnoho těchto směsí obsahuje sloučeniny bromu zpomalující hoření, a s postupem času dojde k jejich omezení, stejně jako tomu je u olovnatých pájek.

Budoucí ekologické předpisy a neustálé zlepšování výkonu čipu doslova vneslo do centra dění termoplasty. Ty mohou být oproti termosetům, založených na epoxidové pryskyřici, levnější, šetrné k životnímu prostředí, recyklovatelné a mohou se pochlubit téměř hermetickými vlastnostmi. Jedním z nejlepších kandidátů termoplastického pouzdra obsahuje pouze vodík, kyslík, uhlík a přesto se hodí i pro bezolovnaté pájení přesahující teplotu 260 °C. Termoplasty jsou navíc jednodušší a mají více předvídatelné chemické složení než epoxidy. To a mnohem více dává ideální předpoklad pro rozvoj nových pouzdřicích materiálů, založených na bázi termoplastu [3].

Plastové pouzdřicí techniky zahrnují:

- lisování, lisostřik (molding, injection molding)
- zalévání (potting)
- fluidizace (fluidization)
- zakapávání (glob-topping)
- a máčení (conformal coating)



Obrázek 4 - Plastové pouzdro PBGA od firmy Amkor [15]

¹ TERMOSET = REAKTOPLAST tj. plast, který působením tepla nevratně ztuhne

2.6.1 Materiály pro plastová pouzdra

Existují nejméně 3 základní skupiny plastových materiálů, které se používají k zapouzdření obvodů:

a) Materiály na bázi epoxidové pryskyřice (termosety):

Termosetové plasty, jako např. epoxidy, vznikají reakcí monomerů za vzniku dlouhých řetězců, které jsou vzájemně propojeny, a vytvářejí tak velké makromolekuly. Epoxidy byly prvními široce úspěšnými pouzdřicími materiály a jsou i jedním z nejpoužívanějších materiálů v mikroelektronice (organický substrát FR-4, underfill², lepidla atd.). Nevýhodu vidím ve značném obsahu sloučenin bromu, aby epoxidová směs vůbec splnila standardy hořlavosti, a také vysokou absorpci vlhkosti. Mnozí se však domnívají, že s rostoucími požadavky na pouzdra a desky plošných spojů (dále jen DPS), budou termosety, zejména epoxidy, zaostávat [3].

Tyto materiály jsou pevné. Přidáním skleněných mikročástic se sníží hustota a přidáním kovu nebo jiného prášku vzroste tepelná a elektrická vodivost pouzdra. Epoxidové pryskyřice jsou jednodílné či dvoudílné směsi a vyžadují přísnou kontrolu míchacích, odlévacích a vytvrzovacích procesů. Používají se jako varianta zajišťující nízké náklady, vysoký výkon, spolehlivost, nehermetičnost pouzdra [6].

b) Termoplasty:

Další polymerní třídou jsou již zmíněné termoplasty, které účinkem tepla opakovaně přechází do plastického tvaru a ochlazením tuhnou. Jedny z prvních termoplastů měly problémy se změkčením a deformací při pájecích teplotách, ale to už se dnešních materiálů netýká.

V tabulce 1 jsou porovnány nejideálnější termoplasty z hlediska požadavků na pouzdření a všechny tyto materiály vydrží teploty bezolovnatého pájení. Jako nejperspektivnější vypadá třída polymerů LCP. Jde o velmi inertní termoplast s vysokou odolností proti hoření. Díky svému molekulárnímu uspořádání se jedná o velice ekologické materiály, které projdou bez problému testy hořlavosti, aniž by musely obsahovat speciální přísady, jako je tomu u epoxidových směsí. Další výhodou je i vysoký bod tání (MP – Melting point). Komerční LCP termoplasty mají asi 10x lepší bariérové vlastnosti než epoxidy, při vystavení vlhkosti se chovají podobně jako sklo [3].

Tabulka 1 - Termoplasty vhodné pro pouzdření [3]

plasty	absorpce vody [%]	bod tání [°C]	CTE [ppm·K ⁻¹]
LCP	0,02 – 0,10	280 – 352	0 – 12
PEEK	0,15	340	16
PPA	0,15 – 0,29	310 – 332	22 – 40
PPS	0,01 – 0,04	280	19 – 27

- LCP = Liquid Crystal Polymer (v makromolekule mají zabudované kapalně krystalové struktury), PEEK = Polyetherketon, PPA = Polyphthalamid (polyamid), PPS = Polyfenylsulfid

² UNDERFILL je vyplňovací hmota pod flip čip, zlepšuje odvod tepla a mechanické vlastnosti

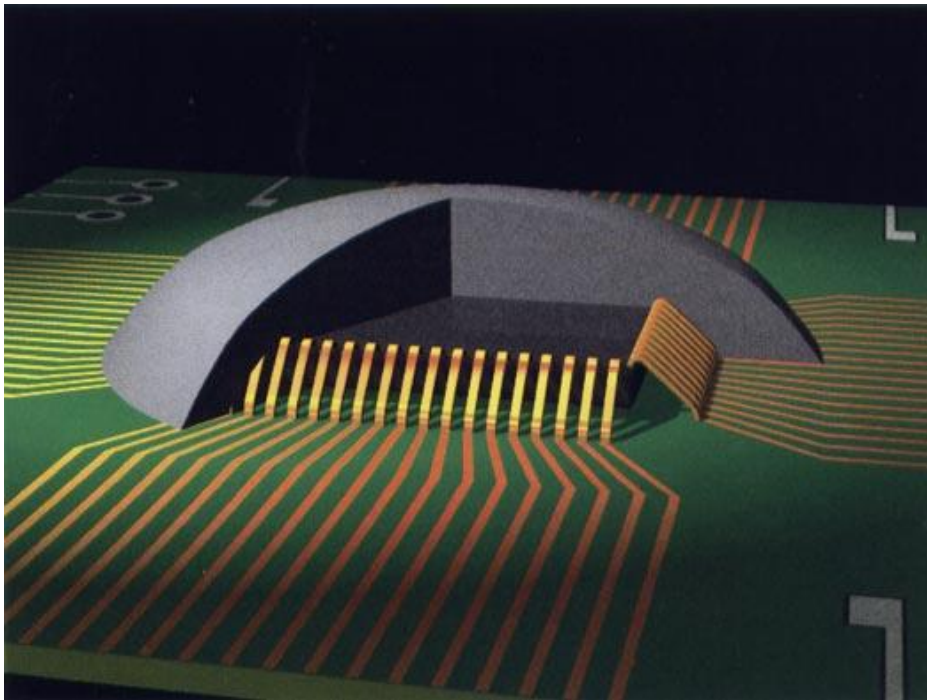
c) Materiály na bázi silikonu (elastomery):

Tyto materiály jsou známy především pro svoji velmi nízkou hodnotu T_g , což umožňuje zachovat pružnost směsi v širokém teplotním rozsahu, ve kterém navíc nedegradují. Mají tedy tendenci zůstat flexibilní a jsou odolné proti vodě. Chemické složení silikonových směsí, na rozdíl od organických polymerů, nabízí nižší smykové namáhání zapouzdřených dílů během ohřevu, nebo ochlazení. Toho se využívá při zapouzdřování dílů s různými CTE. Pro silikony je typická vysoká hodnota CTE [12].

Některé typy těchto sloučenin vytváří kyselinu octovou během vytvrzování, která může způsobit korozi součástek a vodičů. Doba vytvrzení takového materiálu je funkcí tloušťky a hmotnosti pouzdra a může trvat více než jeden den, než se dosáhne plného vytvrzení [6].

Výhody silikonu jako pouzdricího materiálu [12]:

- nízká absorpce vlhkosti: $< 0,4\%$
- dielektrická pevnost: $20 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$
- teplotní stabilita: -115°C do 260°C
- nízká hodnota smršťování (shrinkage): $< 1\%$



Obrázek 5 - Zakápnutý IO silikonovou pouzdricí směsí [12]

2.6.2 Tabulkový přehled pouzdrících hmot a jejich vlastností

Tabulka 2 - Epoxidové pouzdrící hmoty společnosti EPO-TEK [1]

název	materiál	barva	teplota vytvrzení (min.)	viskozita (23°C) [cPs]	Tg [°C]	CTE (pod a nad Tg) [°C]	tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	rozsahy pracovních teplot (trvalé a nárazové)	objemová rezistivita [Ω·cm]	použití
301	epoxid	bezbarvá	65 °C – 1 hod 23 °C – 24 hod	100 - 200	≥ 65	39·10 ⁻⁶ 98·10 ⁻⁶	- (opto-aplikace)	-55°C – 200°C -55°C – 300°C	1·10 ¹³	zakápnutí
H70E-2	epoxid	černá	175 °C – 1 min 80 °C – 90 min	9,000 – 15,000	≥ 80	20·10 ⁻⁶ 112·10 ⁻⁶	1,00	-55°C – 200°C -55°C – 300°C	8·10 ¹²	zakápnutí
H77	epoxid	šedá	150 °C – 1 hod	6,000 - 12,000	≥ 80	33·10 ⁻⁶ 130·10 ⁻⁶	0,66	-55°C – 250°C -55°C – 350°C	1·10 ¹³	zalití
T905BN-3	epoxid	šedá	80 °C – 2 hod	2,000 - 7,000	≥ 40	37·10 ⁻⁶ 151·10 ⁻⁶	2,02	-55°C – 200°C -55°C – 300°C	3·10 ¹¹	zalití

Tabulka 3 – Silikonové pouzdrící hmoty společnosti Polymer Systems Technology [1]

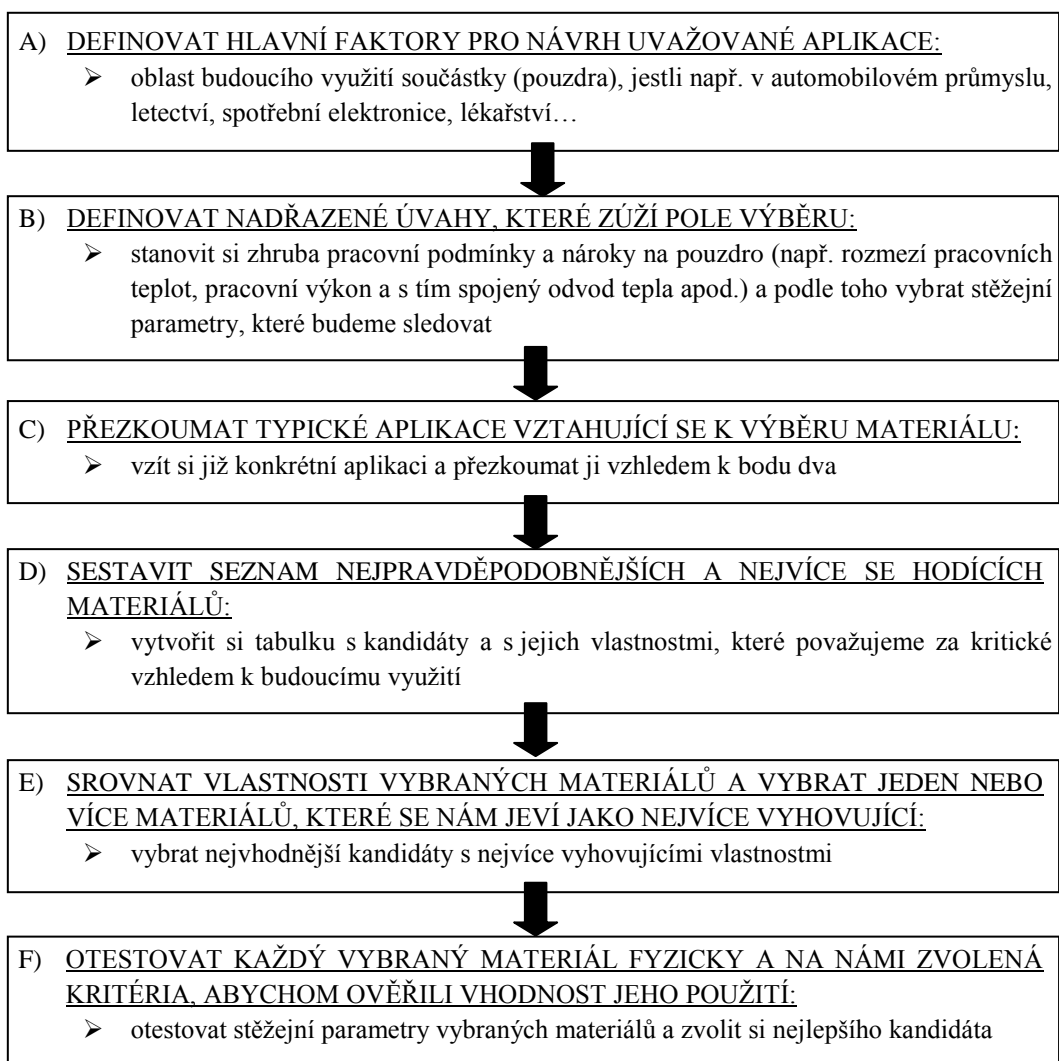
název	materiál	barva	teplota vytvrzení (min.)	viskozita [cPs]	Tg [°C]	CTE (pod a nad Tg) [°C]	tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	rozsahy prac. teplot	objemová rezistivita [Ω·cm]	použití
EPM-2411-1	silikon	černá	200 °C – 15 min	300,000	-	-	-	-65°C – 250°C	-	zakápnutí
EPM-2491	silikon	bílá	65 °C – 4 hod	900,000	-125	-	1,11	-	-	zalití
EPM-2410-1	silikon	bílá	150 °C – 15 min	50,000	-125	60·10 ⁻⁶ 445·10 ⁻⁶	0,23	-115°C – 265°C	1·10 ¹⁵	zalití
EPM-2421	silikon	průhledný	150 °C – 15 min	3,150	-116	400·10 ⁻⁶	-	-65°C – 250°C	8,5·10 ¹⁴	zalití

3 Postup při výběru materiálu pouzdra

Proces výběru materiálu pro elektronické pouzdření zahrnuje mnoho úvah a proměnných. Konečné rozhodnutí je často materiál vybraný z důvodu, který nemusel být evidentní při počátečních úvahách. Tento zdánlivý paradox pramení z povahy práce, které čelí elektrotechnický inženýr při návrhu pouzdra. Jedná se tedy o multidisciplinární problémy, zahrnující hledání rovnováhy mezi funkčností, provedením, vyrobiteľností, spolehlivostí a cenou.

Existuje celá řada vlastností materiálů, které je třeba uvažovat při výběru. Někdy jsou požadavky na provedení pouzdra v rozporu s rozsahem vlastností nabízených materiálů, a proto je zvolené řešení určitým kompromisem. Z hlediska využití materiálu nás zajímá jeho lehkost, akceptovatelné elektrické, chemické a teplotní vlastnosti, odolnost proti mechanickému namáhání a mnoho dalších proměnných. Během vytvrzování by materiál neměl vykazovat nadměrné teploty a neměl by nadměrně namáhat zapouzdřené díly. Po vytvrzení by materiál neměl absorbovat vlhkost, neměl by vykazovat nadměrné silové namáhání během teplotních cyklů, musí být dostatečně tuhý pro mechanickou podporu součástí a spojů, a měl by se dát opakovaně odstranit za účelem opravy [6].

Postup výběru vhodného materiálu pro danou aplikaci je znázorněn na diagramu:



3.1 Výrobní požadavky na materiál

Podle [7] patří mezi výrobní požadavky na materiál především:

- nízká cena materiálu
- nízké ztráty materiálu během používání
- dlouhá skladovací a pracovní životnost materiálu
- levný proces výroby materiálu a technologického zařízení
- nízký obsah organických těkavých látek a rozpouštědel
- nehořlavý, netoxický

3.2 Technologické požadavky na materiál

Technologické požadavky na pouzdrící materiál jsou dle [11] následující:

- jestli je čip připojen k nosnému korpusu (základně), tak by měl mít pouzdrící materiál nízkou dielektrickou konstantu (nízké kapacitní zatížení, což minimalizuje zpoždění signálu)
- materiál by měl mít vysoký koeficient tepelné vodivosti (k usnadnění odvodu tepla od čipu)
- CTE pouzdra by se měl shodovat s CTE čipu, substrátu a těsnících materiálů (nevzniká pak nadměrné pnutí vlivem teplotních cyklů)
- vysoká pevnost a odolnost

4 Faktory ovlivňující návrh pouzdra

Hlavní úvahy při návrhu se vztahují na primární požadavek technického provedení, který musí být kompatibilní s námi zvoleným materiálem, k dosažení technického cíle návrhu. Mezi hlavní parametry jsem zařadil veličiny, které by nás při výběru pouzdrícího materiálu měly zajímat ze všeho nejvíce.

Návrh může mít taky spoustu druhořadých požadavků, ale pokud nejsou splněny ty primární, tak je materiál nevyhovující bez ohledu na splnění ostatních požadavků. Je zcela běžné, že požadavek na materiál zahrnuje více než jeden hlavní, dominantní parametr [6].

Vlastnosti pouzdrících materiálů můžeme rozdělit na:

- elektrické
- tepelné a termomechanické
- mechanické
- chemické
- další

4.1 Elektrické vlastnosti

Mezi nejdůležitější elektrické vlastnosti uvažované při výběru materiálu patří objemová rezistivita, povrchový odpor, dielektrická konstanta, tangenta ztrátového činitele, dielektrická pevnost a další. Tyto elektrické vlastnosti jsou proměřovány a definovány standardními testovacími metodami. Některé vlastnosti mohou být známy pod více než jedním názvem.

Elektrická rezistivita, R (Electrical resistivity)

Rezistivita, někdy zvaná měrný elektrický odpor, je fyzikální veličina, vyjadřující velikost elektrického odporu vodiče s jednotkovým obsahem průřezu na jednotku délky. Vyjadřuje se v jednotkách $\Omega \cdot \text{cm}$ nebo $\Omega \cdot \text{m}$. Rezistivita může být buď povrchová, nebo objemová. Jedním z hlavních požadavků na pouzdřicí materiál je požadavek na elektrickou izolaci, aby se zabránilo nežádoucím zkratům a svodovým proudům, které by poškodily zapouzdřený elektrický obvod. Čím větší je rezistivita, tím větší je elektrický odpor a menší vodivost [11].

a) Povrchová rezistivita, R_S (Surface resistivity)

Povrchová rezistivita je odpor k elektrické vodivosti mezi elektrodami na dvou protilehlých hranách jednotky čtverečního centimetru nebo metru. Jednotkou povrchové rezistivity je Ω . Nicméně kvůli odlišení povrchové rezistivity od elektrického odporu se k vyjádření povrchové rezistivity používá $\Omega/\text{čtverec}$. Povrchová vodivost, resp. rezistivita, se ovlivní obsahem nečistot na povrchu, teplotou okolí a vlhkostí. Materiály s vyšší povrchovou rezistivitou poskytují lepší izolaci proti elektrické vodivosti na svém povrchu [11].

Měření:

- povrchová rezistivita se měří podle normy ASTM D257 a ASTM D1829

b) Objemová rezistivita, R_V (Volumetric resistivity)

Objemová rezistivita, vyjádřena v $\Omega \cdot \text{cm}$, je elektrický odpor mezi opačnými stěnami jednotkové krychle za předpokladu, že proud prochází pouze objemem vzorku. Objemová rezistivita se mění s teplotou, obsahem vlhkosti, přiloženým napětím a s dobou, po kterou je napětí přiloženo. Objemová rezistivita se určí ze vztahu:

$$R_V = \frac{R \cdot S}{l} \quad (1)$$

kde R je elektrický odpor vzorku materiálu [Ω],

S je obsah kolmého průřezu [m^2],

l je aktivní délka vzorku [m].

Opět platí obecně, že materiál s větší objemovou rezistivitou je lepší izolant [11].

Měření:

- objemová rezistivita se měří podle normy ASTM D257 a ASTM D1829

Dielektrická konstanta, ϵ (Dielectric constant)

Dielektrická konstanta je bezrozměrná veličina, také někdy označována jako relativní permitivita. Na velikosti relativní permitivity materiálu závisí velikost parazitní kapacity a indukčnosti (čím nižší ϵ , tím kvalitnější materiál). K určení elektrických výkonových ztrát izolujícího materiálu, který je vystaven střídavému elektrickému signálu, se používá komplexního čísla, tzv. komplexní permitivity, která je definována jako:

$$\epsilon = \epsilon' - \epsilon'' \quad (2)$$

kde imaginární část ϵ'' je ztrátové číslo,

reálná část ϵ' je dielektrická konstanta izolujícího materiálu.

Dielektrická konstanta většiny materiálů závisí na frekvenci přiloženého elektromagnetického pole a roste se snižující se teplotou. Protože má voda poměrně vysokou dielektrickou konstantu, větší než většina elektronických materiálů, tak tato konstanta roste i s rostoucí absorbovanou vlhkostí [11].

Měření:

- dielektrická konstanta se měří podle normy ASTM D150

Ztrátové číslo, ϵ'' (Loss factor)

Ztrátové číslo je bezrozměrná veličina. Jedná se o imaginární část komplexní dielektrické permitivity. Záporné znaménko indikuje ztrátu elektrické energie z vodiče. Tato ztracená elektrická energie, absorbována v jednotce objemu izolujícího materiálu, je dána velikostí ztrátového činitele a velikostí elektrické energie procházející skrz vodič. Čím menší je ztrátové číslo, tím méně energie se rozptýlí v izolačním materiálu. Toto je potřeba brát v úvahu obzvláště u vysokovýkonných obvodů operujících na vysokých frekvencích. Ztrátové číslo je funkcí materiálových podmínek, jako je teplota a velikost absorbované vlhkosti [11].

Tangenta ztrátového činitele nebo ztrátový činitel, $\tan \delta$ (Loss tangent or dissipation factor)

Tangenta ztrátového činitele je bezrozměrná veličina. Je dána poměrem ztrátového činitele a dielektrické konstanty:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

$\tan \delta$ závisí nejen na aktuálních materiálových podmínkách, jako je teplota a množství absorbované vlhkosti, ale i na frekvenci elektromagnetického pole. Pro většinu polymerních materiálů $\tan \delta$ klesá s rostoucí frekvencí, ale roste s rostoucí teplotou [11].

Měření:

- tangenta ztrátového činitele se měří podle normy ASTM D150

Dielektrická pevnost, V_{DS} (Dielectric strenght)

Jednotkou dielektrické pevnosti je megavolt na centimetr ($MV \cdot cm^{-1}$), je definována jako napěťový gradient, kterému izolační materiál odolává, než dojde ke vzniku elektrického oblouku procházejícího skrz daný materiál, tzv. průrazu. Dielektrické materiály se dělí do několika skupin vzhledem k přiloženému napětí a souboru teplotních a vlhkostních podmínek. Dielektrická pevnost je nepřímo úměrná tloušťce zkušební vzorku, to znamená, že tlusté zkušební vzorky mají nižší dielektrickou pevnost než tenké vzorky. Čím vyšší je dielektrická pevnost, tím lepších dosáhneme izolačních výsledků [11].

Měření:

- dielektrická pevnost se měří podle normy ASTM D149

Izolační odpor, IR (Insulation resistance)

Izolační odpor je spíše měřítkem kvality izolování pouzdrů architektury, nežli materiálovou vlastností. Jedná se o odpor izolujícího materiálu k napětí, procházejícímu skrz vodící plošky a konstrukci pouzdra. Hodnota izolačního odporu je užitečná pro srovnávací vyhodnocení izolačních vlastností materiálů za daných testovacích podmínek. Objemová i povrchová rezistivita se podílí na svodových proudech, které jsou při pouzdření elektronických struktur nežádoucí [11].

Měření:

- izolační odpor se měří podle testovací metody 1003 normy MIL-STD 883C

Elektromagnetické a elektrostatické stínění (Electromagnetic and electrostatic shielding)

Elektromagnetické stínění se využívá jako prevence proti rušivým vlivům elektrických vln z okolního prostředí, např. proti radiovým vlnám, které indukují v elektronických obvodech nežádoucí napětí a proudy.

Elektrostatické stínění poskytuje prevenci proti penetraci (průniku) vysokonapěťových výbojů na povrchu pouzdra (jako následek statického výboje) a tím zabráňuje poškození elektrických součástek uvnitř pouzdra nebo zhoršení výkonu zařízení.

Ochrana zařízení před oběma potencionálními zdroji zhoršení výkonu zahrnuje použití takového stínění, které zabrání radiovým vlnám nebo jinému elektromagnetickému šumu, projít skrz pouzdro a způsobit tak poškození. Dále má sloužit k rozptýlení nežádoucí energie tím, že poskytne vodivou cestu k vypuštění energie (uzemnění).

Obvod může být chráněn uzavřením do vodivého pouzdra, tím se vytvoří Faradayova klec, kde nashromážděné elektromagnetické vlny a statické náboje indukují na povrchu pouzdra proudy, které neproniknou skrz pouzdro, takže nedojde k poškození obvodu.

Na druhou stranu v podstatě stejné techniky se používají k zachycování úniku emisí radiových vln z elektronického obvodu do okolí, což by mohlo způsobit poruchu jiných součástek, citlivých na tyto emise. Vysokorychlostní digitální obvody

s kmitočtem přesahujícím 10 kHz produkují tyto emise a často vyžadují elektromagnetické stínění, kvůli splnění emisních požadavků. U nekovových pouzder se k ovládnutí elektromagnetického pole pokryje pouzdro vrstvou barvy, obsahující kovový prášek. Primárním parametrem, k posouzení účinnosti materiálu jako elektrostatického stínění, je hodnota elektrické vodivosti materiálu [6].

Magnetické stínění (Magnetic shielding)

Magnetické stínění poskytuje ochranu obvodu před vznikem kolísání energie magnetického pole, které by mohlo indukovat proudy ve vodičích a prvcích z kovové konstrukce, což by vedlo k nesprávné funkci nebo závadě obvodu. Použití stínění na principu Faradayovy klece nás neochrání před nežádoucími účinky magnetického pole. Je nutné omezit stínicí materiály (např. slitiny železa s vysokým obsahem niklu). Slitiny obsahující železo jsou magnetické a zabráňují pronikání magnetického toku do zařízení, který by indukoval nežádoucí šum v obvodu nebo by mohl způsobit jeho poruchu (např. vymazání paměti integrovaných obvodů) [6].

4.2 Tepelné a termomechanické vlastnosti

Materiály pro pouzření prochází během výroby, skladování a užívání mnohými teplotními změnami, teplotními cykly a šoky. Tepelné vlastnosti těchto materiálů jsou významné po celý životný cyklus pouzdra a zahrnují např. koeficient teplotní roztažnosti (CTE), tepelnou vodivost, teplotu skelného přechodu, tepelnou kapacitu.

Teplota skelného přechodu, T_g (Glass transition temperature)

Teplota skelného přechodu je jednou z nejdůležitějších vlastností polymerů. Je to teplotní oblast, ve které přechází polymer z pevného, sklovitého skupenství do měkké, pružné, ohebnější hmoty. Při těchto teplotách polymerní řetězce významně zvyšují svoji pohyblivost a dochází k již zmíněné změně struktury. Pro amorfní polymery dochází ke změně stavu v určitém rozmezí teplot. U krystalických polymerů, např. polytetrafluorethylen (PTFE), nedochází k fázím postupného snižování viskozity s rostoucí teplotou, ale mají svoji teplotu tání [11].

Konečná teplota, resp. teplotní oblast, skelného přechodu je určena mnoha faktory, např. chemickým složením, typem tavidla a je silně závislá na procesu vytvrzování polymeru. S absorpcí vlhkosti se může T_g výrazně snížit, s čímž by měl návrhář pouzdra počítat [1].

Za teplotou skelného přechodu dochází k dramatickým elektrickým, termomechanickým a mechanickým změnám vlastností materiálu. U reaktoplastů dochází ke změnám postupně na rozdíl od termoplastů. Změny vlastností jsou u termoplastů vratné, po ochlazení pod T_g, zatímco u reaktoplastů vratné nejsou. To je dáno rozdílem ve složení molekulárních řetězců.

Měření:

- teplota skelného přechodu se měří pomocí diferenční skenovací kalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry - DSC) podle normy ASTM E1356

Tabulka 4 - Teplota skelného přechodu vybraných materiálů [11]

materiál	T _g [°C]
FR-4	125 – 135
FR-5	140 – 160
vysokoteplotní pryskyřice	170 – 180
bismaleinimidová pryskyřice (BT)	180 – 190
kyanátesterová pryskyřice	240 – 250
polyimid	240 – 260
PTFE (polytetrafluorethylen)	327

Tepelná vodivost, λ (Thermal conductivity)

Tepelná vodivost materiálu je schopnost vést teplo. Všechny materiály vedou teplo a existuje široká škála materiálů s odlišnou tepelnou vodivostí. Polymerní materiály jsou obecně špatnými vodiči a vykazují velmi nízkou tepelnou vodivost, často o řád až dva horší než kovy. Keramika má lepší tepelnou vodivost než polymery. Obecně platí, že materiály s vysokým elektrickým odporem mají nízkou tepelnou vodivost. Výjimkou je oxid beryllia (BeO), ten poskytuje dobrou elektrickou izolaci a teplotní vodivost ve srovnání s kovy [11].

Jednotkou tepelné vodivosti je $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) a značí se λ . Např. stříbro má $\lambda = 429 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, zatímco tepelná vodivost polymerů se pohybuje v rozmezí $0,2 - 0,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Pro zvýšení tepelné vodivosti polymerů se používá hlavně přísad hliníku a nitridu boru. Můžeme použít i stříbro, ale tím by vzrostla i elektrická vodivost a to je v našem případě nežádoucí [1].

Při současném trendu neustálé miniaturizace hraje tepelná vodivost jednu z hlavních rolí. Při návrhu pouzdra se snažíme dosáhnout co nejlepší tepelné vodivosti, aby se zabránilo přehřívání čipu a tím i negativním dopadům na celý systém [6].

Měření:

- tepelná vodivost materiálu se měří pomocí paprskové laserové difuzity (laser flash diffusivity) na základě normy ASTM E1461

Tabulka 5 - Tepelná vodivost a objemová rezistivita vybraných materiálů [11]

materiál	tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹]	objemová rezistivita [μΩ·cm]
stříbro	429	-
měď	380	0,34
hliník	210	0,52
nitrid hliníku	200	10 ¹⁹
olovo	36	4,4
oxid hlinitý	30	10 ²⁰
sklo	1,35	-
polyimid	0,2	10 ²⁰

Tepelná roztažnost (Thermal expansion)

Koeficient teplotní roztažnosti (TCE) je vlastnost materiálu, která při návrhu pouzdra pomůže elektrotechnickému inženýrovi předejít lineárním nebo objemovým změnám materiálu při změnách teplot. Nejčastěji se vyjadřuje v ppm·°C⁻¹ (nebo v ppm·K⁻¹) a obvykle je nad T_g 3x až 4x větší než pod T_g [1].

Z hlediska návrhu pouzdra je důležité stanovit si hodnoty TCE pro materiály, které jsou spojeny nebo k sobě mechanicky připevněny. Snahou je, aby se hodnoty TCE co nejvíce shodovaly. Např. připájením křemíkového čipu na desku plošných spojů (TCE pro Si je 2 ppm·K⁻¹ a pro FR4 je 11 ppm·K⁻¹) a vlivem vysokých pracovních kmitočtů dochází k velkým teplotním změnám a může dojít, vlivem mechanického namáhání spojů, k jejich selhání. Záleží i na relativní tloušťce materiálů a na způsobu jejich připojení (lepení, pájení, svár, šroub apod.) [6].

Měření:

- CTE se měří pomocí termomechanické analýzy (Thermomechanical Analysis – TMA) podle normy ASTM E831, ASTM E228 nebo D696

Tepelná kapacita, H_C (Heat capacity)

Tepelná kapacita materiálu je množství obdrženého tepla potřebného k ohřátí tělesa o 1 K. Jednotkou je tedy J·K⁻¹. Toto je důležitý parametr při vyhodnocování vhodnosti pouzdríciho materiálu, protože to vypovídá o množství tepla, které může být daným materiálem rozptýleno do okolí. Obzvláště u výkonových aplikací, kde dochází k ohřevu asi nejvíce [11].

Tepelné záření (Thermal emissivity)

Tepelné záření materiálu je měřítkem účinnosti, s kterou bude materiál vyzařovat nebo přijímat energii infračerveného záření. Jedná se o vlastnost povrchu materiálu a do jisté míry i jeho barvy. Pro lepší vysvětlení, vysoce leštěné světlé materiály budou mít nízkou hodnotu tepelného záření, zatímco tmavě zbarvené materiály s vysokou drsností povrchu budou mít tuto hodnotu vyšší.

Když umístíte zapouzdřenou součástku blízko nadměrného tepelného zářiče a chcete snížit množství absorbovaného tepla, které by negativně ovlivnilo parametry obvodu uvnitř pouzdra, použijete takový materiál a povrchovou úpravu, aby bylo dosaženo co nejnižší hodnoty tepelného vyzařování.

Tepelné záření by tedy nemělo být jedním z hlavních požadavků na vlastnost materiálu, protože se dá kdykoli ovlivnit až konečnou povrchovou úpravou. Nabarvení povrchu světlou barvou může lehce snížit emisivitu v porovnání s tmavými povrchy, avšak drsnost povrchu použitého materiálu je v podstatě stále stejná bez ohledu na odstín použité barvy, tedy zlepšení je to nepodstatné. Může se i stát, že po natření tmavého leštěného povrchu světlou barvou se emisivita zvýší a ne sníží [6].

4.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti materiálu ovlivňují jeho schopnost vydržet zátěž vlivem vibrací, otřesů, termomechanického namáhání během výroby, montáže, skladování. Hlavní vlastnosti, které jsou důležité pro elektronické pouzření, zahrnují modul pružnosti, Poissonův poměr, pevnost v tahu, tlaku, modul ohybu, mez pevnosti materiálu apod.

Modul pružnosti v tahu neboli Youngův modul, E (Modulus of elasticity or Young's modulus)

Pokud je rovná tyč z odpovídajícího materiálu vystavena relativně malému napětí v tahu nebo tlaku, dochází k jejímu prodloužení či smrštění. Prodloužení na jednotku délky se nazývá relativní deformace a značí se ε , zatížení na jednotku plochy je napětí v tahu a značí se σ . Pro většinu materiálů s malým relativním prodloužením je napětí v tahu přímo úměrné relativní deformaci (podle Hookova zákona) a naopak, dokud napětí nedosáhne meze skluzu materiálu, podle vzorce (4):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

kde E je konstanta úměrnosti, známá jako modul pružnosti nebo Youngův modul.

Relativní deformace je bezrozměrná veličina a jednotky modulu pružnosti jsou stejné jako jednotky napětí v tahu, vyjádřené v Pascalech (Pa). Materiály s větším modulem pružnosti mají menší deformace při působení stejného napětí. Modul pružnosti je funkcí teploty a rychlosti deformace [11].

Měření:

- Youngův modul se určuje podle normy ASTM D638 nebo ASTM E111

Pevnost v tahu, σ_t , tlaku, σ_c , mez pevnosti, σ_u (Tensile, compressive and ultimate strenght)

Pevnost v tahu, resp. mez pevnosti, je maximální napětí, které můžeme aplikovat na daný materiál, při testování namáhání v jedné ose. Analogická definice platí pro pevnost v tlaku při testování tlakového zatížení. Vysoká hodnota meze pevnosti indikuje schopnost materiálu snést působení napětí před vznikem prasknutí, přetržení materiálu.

Poněvadž je lehké určit mez pevnosti, je tato vlastnost vhodná pro účely specifikace navrhovaného pouzdra a pro kontrolu kvality výrobku [11].

Měření:

- k určení pevností se používá norma ASTM D638

Modul ohybu, FM (Flexural modulus)

Modul ohybu je modul elasticity materiálu, zjištěný na základě ohýbacího testu. Tento test se provádí na zkušebním nosníku, který je podepřen ve třech bodech. Modul ohybu se pak spočítá na základě rovnice (5):

$$FM = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot d \cdot b \cdot h^3} \quad (5)$$

kde P je přiložená zátěž [MPa],

l je délka nosníku mezi podpíracími body [mm],

b je šířka nosníku [mm],

h je jeho výška [mm],

d je průhyb nosníku od středového bodu jeho délky [mm].

Vysoká hodnota FM představuje tvrdý materiál v ohybu. S rostoucí teplotou se FM zmenšuje [11].

Měření:

- modul ohybu se určí dle normy ASTM D790

Poissonův poměr, ν (Poisson's ratio)

Poissonův poměr, taktéž nazýván Poissonovo číslo, je bezrozměrná veličina. Toto číslo vyjadřuje absolutní hodnotu poměru relativního zkrácení k relativnímu prodloužení vzorku namáhaného tahem, je to další charakteristická elastická konstanta. Pro izotropní materiály se Poissonův poměr pohybuje v rozmezí hodnot 1 a 0,5. Ale pro kompozitní materiály to může být ještě méně. Polymery, zahrnující epoxidy a lepidla, mají většinou vyšší hodnotu Poissonova poměru než keramika a sklo [11].

Nesoulad v Poissonových poměrech spojovaných materiálů může vést k biaxiálnímu (dvouosému) zatížení.

Měření:

- Poissonův poměr se určuje podle normy ASTM C623 a ASTM E132

Lomová houževnatost, K_{ic} (Fracture toughness)

Lomová houževnatost je materiálová charakteristika vyjádřená kritickým součinitelem intenzity napětí (K_{ic}) v $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Charakterizuje odpor materiálu proti vzniku ostré trhliny. Umožňuje citlivé kvalitativní posouzení materiálu i zjištění lomového napětí v závislosti na velikosti defektu (trhliny).

Jelikož tloušťka testovaného materiálu hraje důležitou roli v reakci na vzniklou trhlínu, hodnota K_{ic} naměřená při testování je použitelná pouze pro danou tloušťku. U křehkých materiálů je tento efekt zanedbatelný a K_{ic} se považuje za materiálovou vlastnost. Materiály s nízkou hodnotou K_{ic} udrží při daném napětí menší prasklinu, jinak je zapotřebí použít tlustší testovací vzorek, aby nedošlo ke vzniku trhliny. Lomová houževnatost často klesá s klesající teplotou a rostoucí deformační rychlostí.

K_{ic} se zkouší postupným zatěžováním zkušebního tělesa, opatřeného vrubem a prodlouženou únavovou trhlínou, tříbodovým ohybem nebo excentrickým tahem až do lomu za dané teploty [11].

Měření:

- lomová houževnatost se určuje podle metody ASTM E399 a ASTM B646

4.4 Chemické vlastnosti

Chemické vlastnosti pouzdrících materiálů jsou důležité, protože tyto materiály musí vydržet ve výrobním, skladovacím prostředí, musí vydržet i během zacházení se samotnou součástí. Mezi ty nejdůležitější chemické vlastnosti můžeme zařadit odpor ke vzniku koroze, absorpci vlhkosti, hořlavost.

Absorpce vlhkosti (vody), D_m (Moisture absorption)

Absorpce vody je definována jako přírůstek váhy materiálu po ponoření do vodní lázně po specifickou dobu a teplotu. Tento přírůstek je vyjádřen jako procenta z celkové suché váhy materiálu. Vodní absorpce závisí na chemické povaze materiálu a na přítomnosti pórů a dutin v materiálu. S absorbovanou vlhkostí se většinou mění elektrické vlastnosti pouzdrících materiálů [11].

V mnoha případech, kdy vybíráme vhodný izolační materiál, tedy materiál vhodný pro pouzdrění, nebo materiál rozměrově neměnný ve vlhkém prostředí, tak je pro nás důležitý právě tento parametr. Pro kovy není absorpce vlhkosti významnou vlastností, nicméně pokud jsou různé kovy v těsném kontaktu, může vlhkost urychlit galvanickou korozi.

Pro nekovy, porézní sintrované kovové struktury a keramiku je absorpce vlhkosti důležitá z hlediska elektrické izolace, vlivem absorpce vlhkosti může být zhoršena schopnost izolace. Izolant se tedy může stát elektricky vodivým, pokud je

vystaven vlhkému prostředí. Nejlepšími kandidáty jsou hydrofobní (vodu odpuzující materiály, kde povrchové napětí způsobí, že nedojde k navlhčení povrchu) materiály.

Většina nekovových materiálů je testována na absorpci vlhkosti a výsledná data jsou pak uvedena ve výpisech materiálových vlastností. Tato naměřená data se obvykle vztahují na absorpci vody za určitý čas.

V některých případech, zejména pro organické látky, absorpce vlhkosti vede ke ztrátě pevnosti a fyzickému poškození. Pokud materiál navlhne a následně se nechá zaschnout, tak může vykazovat trvalé smršťování a neschopnost přestavět zpět své původní fyzikální vlastnosti. Pokud materiál již absorboval vlhkost a je vystaven teplotám pod bodem mrazu, může dojít k jeho trvalému poškození v důsledku expanze materiálu, ke které dochází při zamrznutí.

Při vysoké vlhkosti a přítomnosti anorganických solí jsou vytvořeny ideální podmínky pro růst plísní. Růst plísní může vést k degradaci materiálu, ztrátě pevnosti a rozvoji nežádoucích zkratů. Materiály se dělí na plísně-vyživující (fungus nutrient) a na plísně-odolné (fungus resistant). Materiály, jako např. kovy, sklo, keramika, slída, silikonové pryskyřice, azbest, akryláty a omezené množství plastových pryskyřic jsou odolné proti plísním. Materiály obsahující organické složky např. pryže, epoxidové pryskyřice, mnoho maziv, polyethyleny o nízké hustotě, sloučeniny formaldehydu a další, jsou materiály podporující růst plísní [6].

Měření:

- absorpce vlhkosti se určuje dle metody ASTM D570

Hořlavost (norma UL 94) a kyslíkový index (OI) (Flammability and oxygen index)

Hořlavost materiálu je specifikována jako samozhášecí stupeň (flame retardant grade) nebo jako kyslíkový index. Hořlavost je vlastnost materiálu, kdy je hoření materiálu ukončeno, zabráněno, nebo potlačeno použitím dalšího hořlavého nebo nehořlavého zdroje vznícení.

Podle standardů hořlavosti (UL 94) byly materiálům, na základě jejich hoření, přiřazeny samozhášecí stupně. Jednotlivé stupně jsou HB, V-0, V-1, V-2 a 5V, kde HB je nejvyšší a 5V je nejnižší rychlost hoření. Číselná hodnota hořlavosti je dána kyslíkovým indexem.

Kyslíkový index, nebo kyslíkové číslo, je minimální koncentrace kyslíku v definované směsi dusíku a kyslíku, při které vzorek ještě hoří. Čím vyšší je tato hodnota, tím větší je odolnost materiálu proti vznícení a hoření.

Polymery, obsahující větší množství vodíkových atomů (polyethylen, celulóza), mají vysokou hořlavost. Za normálně hořlavé se zpravidla považují materiály s kyslíkovým indexem do 21%. Menší hořlavost mají polymery s aromatickými články a ty, co obsahují halogeny (aramidy). Všechna anorganická vlákna (azbestová, skleněná, keramická) jsou prakticky nehořlavá. Za nehořlavé se někdy označují také materiály, které se v plameni pouze taví a po vyjmutí z plamene ihned zhasínají, např. PVC nebo oxidovaný polyakryl. Obecně hořlavost polymerů může být snížena přidáním halogenových sloučenin, estery kyseliny fosforečné, nebo přidáním oxidů antimonu [11].

Měření:

- kyslíkový index se určí dle metody ASTM D2863

Odolnost proti korozi (Corrosion resistance)

Schopnost materiálu odolat zhoršení jeho vlastností vlivem chemických nebo elektrochemických „útoků“. Koroze se vyskytuje u kovů z velké části v důsledku vzniku elektrochemického článku a u nekovů je to důsledek chemického napadení materiálu.

Elektrochemický článek je složen z anody, katody a medium mezi nimi se nazývá elektrolyt. Rozdíl elektrického potenciálu mezi anodou a katodou řídí elektrochemickou reakci, což má za následek rozpouštění anody ve formě iontů do roztoku elektrolytu a nepřetržitého toku elektronů mezi anodou a katodou. K posouzení odolnosti proti korozi se používá oxidační potenciál. Tento potenciál udává hodnotu potenciálu galvanického článku při spojení dvou kovů. Čím menší je potenciál, tím více je kov odolný ke vzniku koroze. Koroze u nekovových materiálů vede ke vzniku stabilnějších sloučenin a může vést ke ztrátám v hmotnosti materiálu, rozkladu, depolymerizaci, či degradaci fyzických vlastností materiálu [11].

4.5 Další vlastnosti

Hustota materiálu (Density of material)

Hustota je obvykle měřítkem hmotnosti materiálu pro danou jednotku objemu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Změnou hustoty můžeme docílit snížení hmotnosti pouzdra. Hustota dále určuje setrvačnost a rezonanční kmitočet mechanických prvků a tím, do jaké míry jsou ovlivněny mechanickými vibracemi a mechanickým šokovým zatížením (mechanical shock loading) [6].

Měření:

- hustota materiálu se určí dle metody ASTM D792

Viskozita a tixotropní index (Viscosity and thixotropic index)

Viskozita i tixotropní index (TI) se používají k vyjádření reologie³ polymeru. Viskozita je míra odporu tekutiny proti proudění, toku a je měřena v Poisech (Ps) nebo centiPoisech (cPs), přičemž viskozita 1 cPs (= 1 mPa·s) je rovna viskozitě vody při pokojové teplotě. Např. viskozita medu je 10 000 cPs, takže čím menší hodnota viskozity, tím méně síly potřebuje materiál k toku. Je-li to nutné, viskozita se snižuje zvyšováním teploty. Tento pokles je exponenciální a využívá se při zalévání elektrických obvodů a systémů termoplastovou pouzdřicí směsí.

TI je poměr viskozit materiálu při dvou různých rychlostech. Tato hodnota je orientační schopností materiálu udržet svůj tvar [1].

Měření:

- viskozita i TI se měří pomocí viskozimetru podle normy ASTM D2393

³ REOLOGIE je nauka o deformaci látek v závislosti na čase

Chemická odolnost (Chemical inertness)

Materiály mohou být vystaveny během své životnosti mnoha chemickým látkám (např. palivům, mazivům, čistícím pastám a dalším chemikáliím používaných v průběhu průmyslového procesu). Většina tabulek shrnujících vlastnosti materiálů poskytuje i omezené informace o chemické odolnosti. Pokud je materiál vystaven jiným podmínkám, než jaké jsou uvedeny v tabulkách, musí daný návrhář pouzdra kontaktovat výrobce a zjistit si dodatečné informace. Je důležité si uvědomit, že chemické reakce jsou ovlivňovány teplotou a přítomností jiných chemických látek. Chemické poškození může být způsobeno [6]:

- a) **ionizujícím zářením** (mění molekulární strukturu a tím i fyzické vlastnosti)
- b) **ultrafialovým zářením** (což může způsobit depleci (vyčerpání) změkčovadel z elastomerů, např. PVC, které se používá pro izolaci vodičů, se stává vlivem UV záření křehčí a slabší)

Toxicita, m_t (Toxicity)

Toxicita, vyjádřená v mikrogramech na metr kubický vzduchu, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, je koncentrace materiálu ve vzduchu, který je při dlouhodobé inhalaci nebezpečný pro lidské zdraví. Např. americká vláda povolila, při použití oxidu beryllia ve výrobě, jeho maximální koncentraci v metru krychlovém vzduchu na 25 μg . K uvolňování těchto částic dochází většinou při obráběcích procesech, jako je broušení, nebo řezání laserem [11].

4.6 Přednostní nároky

Není neobvyklé, že se můžou při návrhu pouzdra objevit přednostní nároky, které tak ovlivní finální výběr materiálu. Často je zde minimální nebo žádná příležitost změnit tyto přednostní nároky, proto musí být volba materiálu provedena takovým způsobem, aby se dosáhlo dominantních technických požadavků na výkon systému a to v souladu s přednostními nároky, mezi které řadíme [6]:

- zákaznické preference pro daný tvar, materiál, či povrchovou úpravu
- omezená výrobní technologie, nedostupnost výrobních strojů
- dostupnost materiálu
- korozivní prostředí
- vystavení elektromagnetickému, elektrostatickému, ionizujícímu, ultrafialovému, nebo infračervenému záření
- mechanická pevnost
- provozní teplota
- odolnost vůči nárazům nebo vibracím prostředí
- vystavení materiálu chemikáliím

5 Teplotní management

Každý elektronický systém, který spotřebovává energii, je ovlivňován teplem vznikajícím při přeměně elektrické energie na tepelnou. Vznik tohoto tepla je nežádoucí, jelikož ovlivňuje parametry celého systému (změny parametrů prvků, termomechanické namáhání apod.). Proto se teplo musí minimalizovat a odvádět. Mezi hlavní zdroje tepla v obvodu patří především pasivní a aktivní součástky.

Přenos tepla prostředím je realizován pomocí částic, nosičů energie, které se v daném prostředí vyskytují, ale mají vyšší energii než částice v jejich blízkosti, nebo se do daného prostředí dostanou z okolí. Z toho důvodu se teplo šíří různými způsoby v závislosti na skupenství látky a na vlastnostech prostoru, ve kterém dochází k jeho šíření. Může se jednat o elementární částice (elektrony, atomy), ale i o elektromagnetické záření, které přenáší energii pomocí fotonů [4].

K ochlazení systému dochází přirozeným odvodem tepla. Tento odvod nastává v důsledku uplatnění principů přenosu tepelné energie. Odvod tepla může být podpořen pasivními chladiči, nebo metodou nuceného chlazení. Základními principy šíření tepla jsou vedení (kondukce), proudění (konvekce), záření (radiace).

5.1 Přenos tepla kondukcí

Přenos tepla vedením nastává v plynném, kapalném i pevném prostředí. Podmínkou je existence spojitého látkového prostředí, ve vakuu kondukce tepla neprobíhá. Tento princip přenosu tepla je dominantní u pevných látek, u kapalin a plynů není příliš výrazný. Přenos tepla vedením v pevných látkách je zprostředkován volnými elektrony nebo přenosem kmitů krystalové mříže (důsledek tepelného pohybu částic). Tento princip umožňuje nejintenzivnější přenos tepelné energie [4].

Pro výpočet kondukce si musíme definovat několik důležitých veličin. Přenos tepla kondukcí je definován Fourierovým zákonem. Ten říká, že hustota tepelného toku q je rovna teplotnímu gradientu a součiniteli tepelné vodivosti, jenž směřuje proti teplotnímu spádu [5] [13]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (6)$$

kde q je hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

λ je tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

$\text{grad } T$ vyjadřuje změnu teploty ve směru šíření.

Úpravou tohoto zákona pro jednorozměrný případ a zanedbáním tepelné kapacity dostaneme velikost tepelného toku prošlého plochou S [13]:

$$\Phi = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (7)$$

kde Φ je tepelný tok prošlý plochou S [W],

S je plocha kolmá k tepelnému toku [m^2],

ΔT je rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$ nebo K],

d je vzdálenost míst s rozdílnou teplotou [m].

5.2 Přenos tepla konvekčí

Přenos tepla prouděním nastává převážně v proudících kapalinách a plynech, popř. plazmatu. K proudění dochází, když si částice látky mění v prostoru svoji polohu a unášejí přitom svoji tepelnou energii s sebou.

Velikost odevzdaného tepla prouděním je dána teplotním rozdílem mezi povrchem (např. pouzdra) a kapalinou nebo plynem. Pro správné určení množství tohoto tepla je nutné stanovit součinitel přestupu tepla α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]. Proudění může být přirozené nebo nucené [4].

Nucené proudění tepla vznikne vnějšími silami (např. ventilátorem). Jeho výhodou je, že může nastat i proti teplotnímu gradientu a lze jím ochlazovat. U přirozeného proudění vznikne pohyb v důsledku různých teplot kapalin a plynů. Celý systém se snaží dostat do ustáleného stavu, kdy každý prvek v systému má stejnou teplotu, tudíž ohřáté médium stoupá proti směru gravitace a na jeho místo proudí chladnější médium. Rozdíl teplot mezi povrchem tělesa a okolním plynem je dán vztahem [4][13]:

$$\Delta T = \frac{\Phi}{\alpha \cdot S} \quad (8)$$

kde Φ je tepelný tok prošlý plochou S [W],

S je plocha kolmá k tepelnému toku [m^2],

ΔT je rozdíl teplot [$^{\circ}\text{C}$ nebo K],

α je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Koeficient přestupu tepla není materiálovou konstantou. Závisí na způsobu odebírání tepla ze stěny a je mírou přestupu tepla na rozhraní prostředí, mezi kterými dochází k výměně tepla. Pro představu jsou v tabulce 7 uvedeny orientační hodnoty.

Tento koeficient lze určit z kritériálních rovnic vyplývajících z teorie podobnosti. Při volném proudění se vypočítá ze součinu Grashofova, Prandtlova, resp. Nusseltova čísla, podle vztahů (9), (10) a (11) [14]:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{\eta^2} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (10)$$

kde l je charakteristický rozměr [m],
 ν je kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 η je dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$],
 c_p je měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ značí hustotu vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 g je gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
 β je koeficient objemové teplotní roztažnosti [K^{-1}],
 a značí teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 λ označuje tepelnou vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ΔT je rozdíl teplot chlazené stěny a média [$^{\circ}\text{C}$ nebo K].

Po vypočtení Grashofova a Prandtlova čísla se získají jejich součinem konstanty C a n , hodnoty těchto konstant jsou uvedeny v tabulce 6. Poté se dosadí do následujícího vzorce, tzv. Nusseltova kritéria [14]:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (11)$$

Tento vztah platí pro vertikální plochu. U horizontální plochy je nutné vztah (11) vynásobit koeficientem 1,3, je-li zdroj tepla umístěn na horní straně a spodní strana zajišťuje chlazení. Pokud je tomu naopak, použije se koeficient 0,7 [14].

Tabulka 6 - Hodnoty koeficientů C a n v závislosti na součinu $Gr \cdot Pr$ [14]

$Gr \cdot Pr$	C	n	chyba [%]
$<10^{-2}$	0,5	0	± 15
$1 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125	± 15
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25	± 15
$2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3	± 8

Koeficient přestupu tepla α se pak určí ze vztahu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \rightarrow \alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{l} \quad (12)$$

kde l je tloušťka materiálu [m],

λ značí tepelnou vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Tabulka 7 - Hodnoty součinitele přestupu tepla dle [4]

	α_{\min} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]	α_{\max} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
klidný vzduch	12,5	125
proudící vzduch	40	2100
proudící kapalina	8400	21000
vroucí kapalina	16800	25100
kondenzující páry	29000	50000

5.3 Přenos tepla radiací

Posledním způsobem je přenos tepla zářením, které se děje pomocí elektromagnetických vln v celém rozsahu vlnových délek. Tento princip nevyžaduje látkové prostředí, probíhá i ve vakuu. Přenos tepelné energie zářením mezi dvěma tělesy probíhá, i když teplota prostředí mezi nimi je podstatně nižší nebo vyšší, než je teplota obou těles. Tento princip se řídí mnohými fyzikálními zákony (např. Stefan-Boltzmannův zákon, Planckův zákon, Wienův zákon...). Všechny jmenované principy šíření tepla se uplatňují současně [4].

Teplo přenesené zářením mezi dvěma tělesy je dáno vztahem [14]:

$$\Phi = S \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 \cdot T_2^4) \quad (13)$$

kde Φ je vyzářený tepelný tok [W],

A obsah plochy tělesa [m^2],

T_1 je teplota povrchu [K],

T_2 označuje teplota okolí [K],

S je faktor zastínění [v rozmezí 0 až 1],

ε je relativní emise povrchu [-],

σ značí Stefan-Boltzmannovu konstantu [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

6 Experimentální část

K praktickému ověření tepelných vlastností pouzdrícího materiálu byl navržen a realizován testovací vzorek, v němž je umístěn zdroj tepla. Z hlediska dostupnosti byl zvolen odporový meandr vytvořený tlustovrstvovou technologií. Ten byl následně zapouzdřen do termoplastové hmoty na bázi polyamidu s využitím pneumatické pouzdricí hlavice Bühnen - HB 500HT (viz obrázek 10). Meandr byl výkonově zatěžován a bylo měřeno rozložení teploty pomocí termočlánku a termokamery.

6.1 Návrh topného meandru

Při návrhu odporového topného meandru bylo uvažováno srovnání tepla, které je produkováno odporovou vrstvou na základě Jouleova zákona (14), a tepla, které je možné odvést z povrchu meandru do okolí (15). Za předpokladu rovnovážného stavu jsou tato dvě tepla sobě rovna.

$$Q_1 = P \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t \quad (14)$$

kde Q je teplo [J],

P příkon odporového meandru [W],

t čas [s],

R značí odpor [Ω],

I je proud [A].

$$Q_2 = p \cdot S \cdot t \quad (15)$$

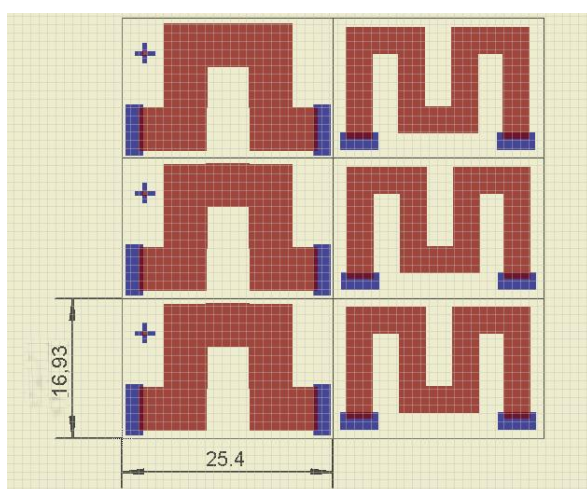
kde p je měrné výkonové zatížení [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$],

S je plocha topného meandru [cm^2]

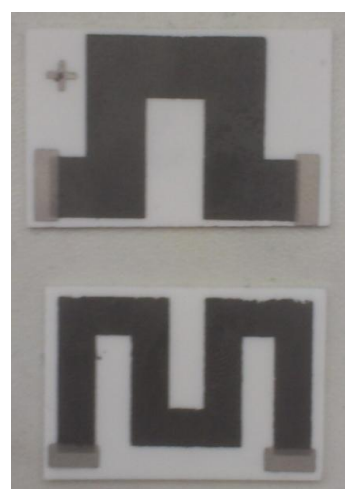
Porovnáním těchto rovnic dostaneme velikost potřebné plochy S meandru, při níž se velikost tepla, produkováného odporovou vrstvou, rovná velikosti tepla, které je tato vrstva schopná odvést do svého okolí.

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow S = \frac{R \cdot I^2}{p} \quad (16)$$

Doporučené měrné výkonové zatížení pro použitou odporovou pastu ESL 3910 s vrstevným odporem $1 \Omega/\square$ a $TCE = +77 \text{ ppm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ je $60 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ a proudová hustota u navržené odporové dráhy by neměla přesáhnout 3 A na mm šířky dráhy (dle [19]). Při návrhu byl uvažován standardní 96% korundový substrát o rozměrech 50,8 mm na 50,8 mm a tloušťce 0,635 mm. Na tento substrát bylo umístěno 6 meandrů, takže byl rozdělen na 6 jednotlivých substrátů, z nichž každý měl rozměr 16,93 mm x 25,4 mm, jak je patrné z obr. 6. Návrh byl proveden s pomocí programu Eagle, kde byly zvoleny dva různé typy meandru. Levý meандр na obrázku 6 byl pracovně nazván meандр_1 a pravý meандр_2. Vzhledem k toleranci odporové pasty po výpalu $\pm 30\%$, stáří pasty a soutiskovým nepřesnostem (horší obrysová ostrost natisknuté pasty a odlišné sesouhlasení) se předpokládá, že jednotlivé odpory se budou lišit od návrhu.



Obrázek 6 - Rozložení meandrů na substrátu



Obrázek 7 - Meandry po vypálení

Po vypálení substrátů následovalo jejich rozdělení na jednotlivé vzorky a přeměření odporů meandrů. Jak již bylo řečeno, vzhledem k toleranci a stáří odporové pasty se jednotlivé odpory lišily, viz tabulka 8.

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty odporů vypálených vzorků

meандр_1				meандр_2			
1.	28,57 Ω	9.	15,95 Ω	1'.	33,56 Ω	9'.	36,13 Ω
2.	13,10 Ω	10.	14,69 Ω	2'.	81,56 Ω	10'.	83,20 Ω
3.	14,14 Ω	11.	14,11 Ω	3'.	35,27 Ω	11'.	34,35 Ω
4.	27,36 Ω	12.	14,26 Ω	4'.	85,99 Ω	12'.	89,96 Ω
5.	31,14 Ω	13.	-	5'.	36,68 Ω	13'.	34,89 Ω
6.	13,95 Ω	14.	-	6'.	34,15 Ω	14'.	82,78 Ω
7.	29,01 Ω	15.	-	7'.	37,85 Ω	15'.	36,55 Ω
8.	13,82 Ω	16.	-	8'.	37,22 Ω	16'.	-

6.2 Měření teploty pomocí termočlánku

Celkem bylo zhotoveno 27 vzorků. U vybraných meandrů byly měřeny tepelné charakteristiky před a po zapouzdrění pomocí termočlánku. Z tohoto množství byly 4 vzorky zapouzdrěny a bylo měřeno rozptýlení tepla termokamerou.

Vybrané vzorky byly připojeny ke zdroji, postupně se zvyšovalo napětí a zapisovaly se jednotlivé teploty, které se pak použily pro stanovení okrajových podmínek simulace. K proměření teplotních charakteristik byl použit 8-kanálový USB termočlánek OMEGA TC-08 (obrázek 8). Sondy termočlánku byly připojeny k meandru pomocí kaptonové lepicí pásky (obrázek 9). Adheze pásky ke korundovému substrátu nebyla ideální, optimálnějším řešením fixace termočlánku by bylo použití např. epoxidové pryskyřice. Z tohoto důvodu je možné, že mohla být měření zatížena chybou. Navíc konvekce vzduchu z chladiče počítače, popř. zdroje napětí, mohla taktéž negativně ovlivnit průběh měření. To vše se může v závěru podílet na rozdílu výsledků simulace a praktického měření.



Obrázek 8 – Termočlánek OMEGA TC-08



Obrázek 9 - Uchycení vývodu termočlánku pomocí polyimidové lepicí pásky

To samé měření bylo zopakováno po zapouzdrění meandrů, kdy bylo na zdroji nastaveno takové napětí, aby meandr vytápěl zhruba na 100 °C. Naměřené hodnoty teplot u vybraných vzorků jsou uvedeny v tabulkách 9 a 10. Teplota T_1 byla měřena na spodní straně vzorku a teplota T_2 naopak na horní.

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty pro meandr_1

vzorek - 2 (13,101 Ω)					po zapouzdření	
U [V]	I [A]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	R _{teplota} [Ω]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]
1	0,075	28,72	28,62	R ₃₀ = 13,16	-	-
2	0,150	38,88	38,63	R ₄₀ = 13,06	-	-
3	0,226	54,44	55,18	R ₅₀ = 12,76	-	-
4	0,301	74,18	75,77	R ₆₀ = 12,45	-	-
5	0,375	96,84	100,26	R ₇₀ = 11,95	73,51	82,34
6	0,452	121,41	128,64	R ₈₀ = 11,43	-	-
-	-	-	-	R ₉₀ = 11,15	-	-
-	-	-	-	R ₁₀₀ = 10,54	-	-
-	-	-	-	R ₁₁₀ = 9,89	-	-
vzorek - 12 (14,26 Ω)					po zapouzdření	
U [V]	I [A]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	R _{teplota} [Ω]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]
1	0,070	28,60	27,30	R ₃₀ = 14,26	-	-
2	0,141	38,54	35,50	R ₄₀ = 14,46	-	-
3	0,210	52,66	42,80	R ₅₀ = 14,76	-	-
4	0,282	73,66	59,91	R ₆₀ = 15,06	-	-
5	0,353	96,63	87,57	R ₇₀ = 15,36	-	-
6	0,432	129,26	93,65	R ₈₀ = 15,46	70,10	80,54
7	0,492	164,12	115,24	R ₉₀ = 15,66	-	-
-	-	-	-	R ₁₀₀ = 16,16	-	-
-	-	-	-	R ₁₁₀ = 16,26	-	-

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty pro meandr_2

vzorek - 3' (35,27 Ω)					po zapouzdření	
U [V]	I [A]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	R _{teplota} [Ω]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]
1	0,028	26,15	25,92	R ₃₀ = 35,49	-	-
2	0,056	28,01	29,63	R ₄₀ = 35,43	-	-
3	0,084	33,96	33,88	R ₅₀ = 35,29	-	-
4	0,112	40,08	39,78	R ₆₀ = 35,29	-	-
5	0,141	61,20	54,46	R ₇₀ = 35,15	-	-
6	0,169	75,22	67,29	R ₈₀ = 35,09	-	-
7	0,197	91,08	83,31	R ₉₀ = 34,99	-	-
8	0,225	106,17	91,63	R ₁₀₀ = 34,87	77,61	64,10
9	0,253	124,77	105,80	R ₁₁₀ = 34,69	-	-
vzorek - 6' (34,15 Ω)					po zapouzdření	
U [V]	I [A]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	R _{teplota} [Ω]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]
1	0,028	26,60	26,70	R ₃₀ = 34,69	-	-
2	0,057	30,23	30,73	R ₄₀ = 34,89	-	-
3	0,086	37,90	37,82	R ₅₀ = 35,49	-	-
4	0,116	47,37	48,36	R ₆₀ = 36,29	-	-
5	0,145	58,38	58,88	R ₇₀ = 37,10	-	-
6	0,173	68,68	72,18	R ₈₀ = 37,79	-	-
7	0,202	91,85	85,14	R ₉₀ = 38,26	-	-
8	0,229	101,27	92,74	R ₁₀₀ = 39,01	77,66	64,48
9	0,258	117,35	114,68	R ₁₁₀ = -	-	-

6.3 Zapouzdření

Jak již bylo řečeno, k zapouzdření obvodu se použila pneumatická pouzdřicí hlavice Bühnen - HB 500HT. Jako pouzdřicí hmota sloužil termoplastový materiál na bázi polyamidu. Po zahřátí tohoto materiálu nad teplotu skelného přechodu začal měknout a pod určitým tlakem byl vytlačován z pouzdřicí hlavice. K vytvarování požadovaného tvaru pouzdra sloužila forma složená ze dvou kovových částí, jedna z nich je na obrázku 11. Po zalití obvodu, který byl vložen do formy, pouzdřicí hmotou, se přiložila vrchní část. Poté se k sobě obě části přitlačily pod tlakem a čekalo se, až klesne teplota hmoty pod teplotu skelného přechodu a dojde k jejímu vytvrzení.



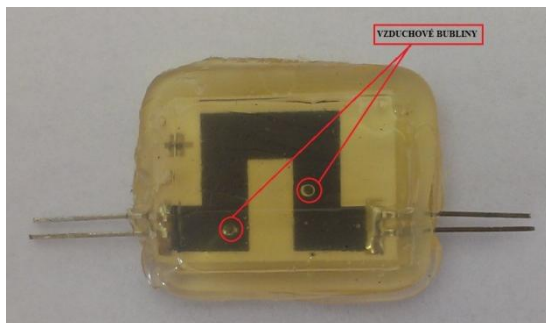
Obrázek 10 - Pouzdřicí hlavice Bühnen - HB 500HT



Obrázek 11 – Forma pro pouzdro

Při aplikaci tohoto postupu docházelo k vytváření nadměrného počtu vzduchových bublin v objemu pouzdra, což je vzhledem k nízké tepelné vodivosti vzduchu nežádoucí, a navíc se v oblasti vývodů vytvářela vzduchová kavita větších rozměrů. Bylo nutné upravit postup zapouzdření. Nejlepších výsledků se dosáhlo při úpravě tlaku pistole, zalití obvodu z jedné a druhé strany a následného samovolného vytvrzení v dutině formy na obrázku 11, již bez použití tlaku a vrchní části formy.

Výsledný vzhled pouzdra po aplikaci a vytvrzení pouzdřicí hmoty pro meandr_1 je vidět na obrázcích 12 a 13. Na obrázku 12 jsou viditelné vzduchové bubliny.

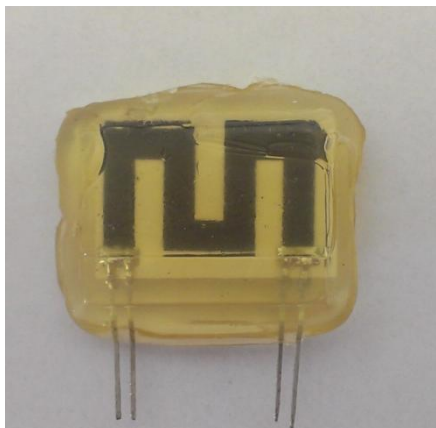


Obrázek 13 - Zapouzdřený meandr_1 horní pohled

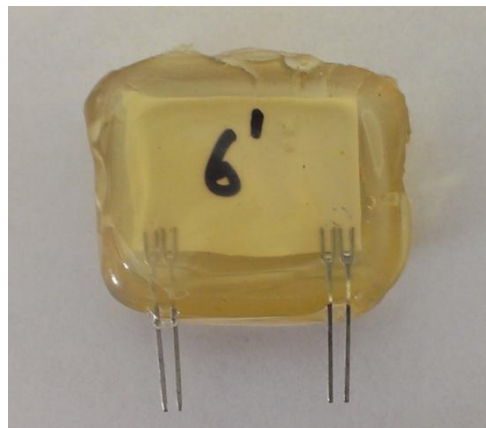


Obrázek 12 - Zapouzdřený meandr_1 spodní pohled

Výsledky po aplikaci a vytvrzení pouzdrící hmoty pro meandr_2 jsou patrné z obrázků 14 a 15.



Obrázek 15 - Zapouzdřený meandr_2 horní pohled



Obrázek 14 - Zapouzdřený meandr_2 spodní pohled

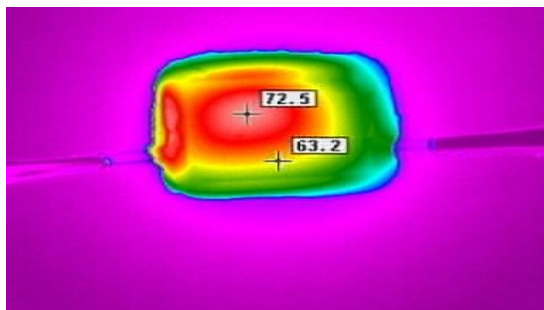
6.4 Měření teplotního rozložení termokamerou

Ke statistickému vyhodnocení by měla být přeměřena větší série vzorků. V rámci bakalářské práce byly vyrobeny, resp. zapouzdřeny, dva vzorky ke každé modifikaci. Měření bylo prováděno v laboratoři za volného proudění vzduchu. Pro měření rozložení tepla zapouzdřeného meandru byla použita kamera EasIR™-9 pracující v infračerveném režimu. Tato kamera je zobrazena na obr. 16. Kamera má rozlišení 384 x 288 pixelů, rozsah měřených teplot je -20 °C do 250 °C (350 °C a 1500 °C jsou volitelné) s přesností ± 2 °C a teplotní citlivostí ≤ 100 mK při 30 °C. Z důvodu korektního měření bylo nutné správně nastavit emisivitu materiálu pouzdra. Emisivita polymerních materiálů se pohybuje v rozmezí 0,8 – 0,97, proto byla nastavena hodnota 0,9. Snímací vzdálenost kamery od vzorku byla nastavena na 30 cm.

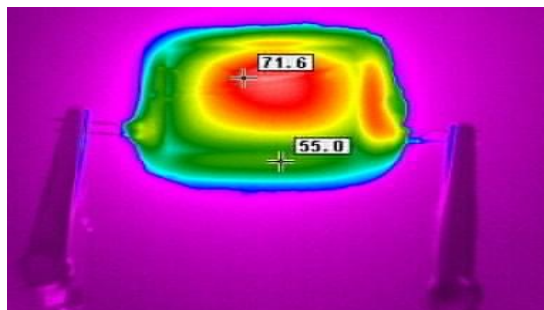


Obrázek 16 - Termokamera EasIR™-9

Výsledky měření pro volné proudění vzduchu jsou znázorněny na následujících obrázcích. Obrázky byly pořizovány z horního pohledu na pouzdro, jedná se tedy o teplotu, která je v tabulkách 9 a 10 označována jako teplota T_2 .

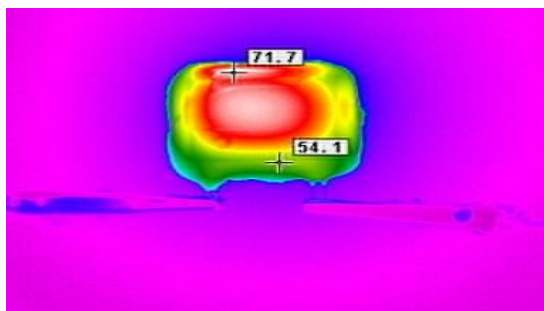


Obrázek 17 - Rozložení teploty vzorku 2

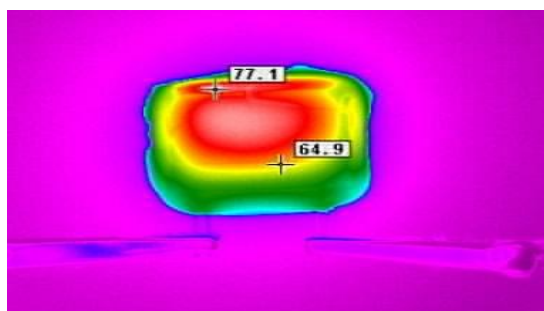


Obrázek 18 - Rozložení teploty vzorku 12

Na obr. 17 a 18 je vidět horní pohled na teplotně ustálený stav pro zapouzdřený meandr_1. Maximální teplota vzorku 2 je 72,5 °C a maximální teplota vzorku 12 dosahuje hodnoty 71,6 °C. Takže průměrná teplota horní plochy zapouzdřeného meandru_1 je rovna 72,05 °C.



Obrázek 19 - Rozložení teploty vzorku 3'



Obrázek 20 - Rozložení teploty vzorku 6'

Na obr. 19 a 20 je vidět horní pohled na teplotně ustálený stav pro zapouzdřený meandr_2. Maximální teplota vzorku 3' je 71,7 °C a maximální teplota vzorku 6' dosahuje hodnoty 77,1 °C. Průměrná teplota horní plochy zapouzdřeného meandru_2 je rovna 74,4 °C.

7 Modelování vlastností pouzder

Pro modelování a simulování tepelných vlastností byl použit software Ansys. Ansys je počítačový program, který se používá pro modelování a simulace mnoha technických problémů. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších a nejobsáhlejších simulačních programů. Je zde možné pracovat v programovatelném prostředí

ANSYS® Classic™, které vzhledem k nutnosti znalostí programovací jazyka APDL a jeho syntaxe není moc uživatelsky přívětivé [14].

Mnohem výhodnější je verze ANSYS® Workbench™, která je vytvořena jako komplexní nástroj simulací. Kromě vlastního prostředí pro tvorbu virtuálního modelu je možný import i z ostatních CAD systémů. ANSYS® Workbench™ umožňuje řešit zadání z oblasti teplotního managementu, elektrických poměrů, mechaniky, proudění kapalin, elektromagnetizmu a mnoho dalších. Tyto fyzikální problémy se dají kombinovat a jednotlivé simulace se na sebe dají řetězit a využívat tak výsledky z ostatních modelů. Ansys pro výpočty využívá metodu konečných prvků [13] [14].

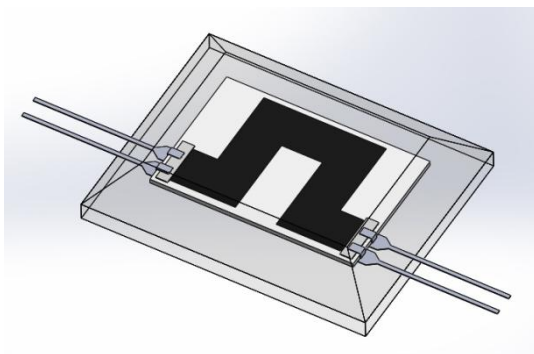
7.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je numerickou metodou, která je založena na rozdělení spojité oblasti na diskrétní části. S rostoucím počtem částí a se zmenšujícími se rozměry roste přesnost výsledku, ale zároveň roste i výpočetní náročnost. Proto se používají nejvýkonnější počítačové sestavy, aby bylo dosaženo co nejkratšího času výpočtů. Uzlová síť, tzv. mesh, může být různě hustá. Zpravidla se na začátku simulace volí menší hustota sítě a až po ověření správnosti nastavení simulace se úseky zmenšují. Hustota sítě se může lokálně měnit pro dosažení přesnějších výsledků v místech největšího zájmu.

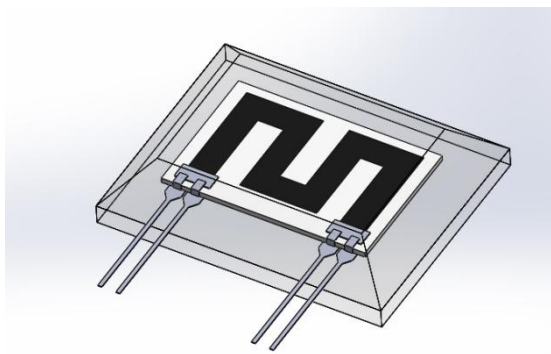
Jako další věc je nutné definovat materiály modelu a stěžejní materiálové vlastnosti. Pokud nás třeba bude zajímat mechanické namáhání modelu, tak nebudeme definovat tepelnou vodivost. Nakonec nesmíme zapomenout na okrajové podmínky simulace [13] [14].

7.2 Simulace

Dalším krokem bylo vytvoření modelů zapouzdřených meandru, přiřazení správných vlastností modelů a definování okrajových podmínek simulace. K vytvoření modelu byl využit software SolidWorks 2013 a možnost importu dat z odlišných CAD systémů přímo do rozhraní ANSYS® Workbench™. Jediným problémem bylo uložit model ze SolidWorksu se správnou koncovkou, resp. ve správném formátu, v tomto případě se jednalo o formát .IGS, který ANSYS® Workbench™ bez problému rozpoznal. Modely zapouzdřeného meandru_1 a meandru_2 jsou na obrázku 21 a 22.



Obrázek 21 - Počítačový model meandru_1



Obrázek 22 - Počítačový model meandru_2

Další nutnou věcí pro zahájení teplotní simulace je výpočet koeficientu přestupu tepla pro přesné definování ochlazování pouzdra přirozenou konvekcí vzduchu. K tomu bude využito vztahů pro výpočet Grashofova, Prandtlova, resp. Nusseltova čísla. Výpočty se provádí zvlášť pro spodní, vrchní a boční strany. Pro názornost je uveden výpočet koeficientu přestupu tepla pro horní plochu pouzdra. Použité fyzikální konstanty vzduchu jsou uvedeny v příloze v tabulce 18. Podle výsledků měření termokamerou a z důvodu zjednodušení výpočtu bylo zvoleno $\Delta T = 50\text{ °C}$, gravitační zrychlení se volí $9,8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Výpočty a simulace se budou provádět vzhledem k teplotě okolí $T_o = 20\text{ °C}$.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} = \frac{1010 \cdot 18,2 \cdot 10^{-6}}{2,52 \cdot 10^{-2}} = 0,7294$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} = \frac{9,8 \cdot (18,2 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 3,419 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{(15,32 \cdot 10^{-6})^2} = 43\,032$$

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 118\,358 \cdot 0,7294 = 31\,388$$

Součinu $\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 31\,388$ odpovídají konstanty $C=0,54$ a $n=0,25$ uvedené v tabulce 6. Tyto hodnoty se následně použijí pro výpočet Nusseltova kritéria upraveného pro výpočet horizontální plochy se zdrojem tepla umístěním na spodní straně ochlazované plochy.

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n \cdot 0,7 = 0,54 \cdot 31\,388^{0,25} \cdot 0,7 = 5,03$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda \cdot \text{Nu}}{l} = \frac{2,52 \cdot 10^{-2} \cdot 5,03}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 36,22\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Koeficient přestupu tepla:

- pro horní plochu pouzdra je dle výpočtů roven $\alpha_1 = 36,22\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- pro spodní plochu je $\alpha_2 = 81,77\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- a pro vertikální stěny je $\alpha_3 = 18,45\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Teplotní analýza:

K provedení ustálené teplotní analýzy (steady – state thermal analysis) stačí definovat teplotní vodivost materiálů použitých v modelu. Pro zajímavost a srovnání bude provedena další simulace s použitím pouzdrů z jiných termoplastů, jmenovitě polytetrafluorethylenu a polyvinylchloridu. Oba tyto materiály mají menší teplotní vodivost než výchozí polyamid, očekává se tedy, že teplo odvedené na povrch pouzdra bude menší, než v případě polyamidu. Při určování tepelných vodivostí bylo čerpáno ze zdrojů [10] a [16], včetně materiálových vlastností čerpaných přímo z implementované knihovny Ansysu.

Tabulka 11 - Tepelné vodivosti použitých materiálů

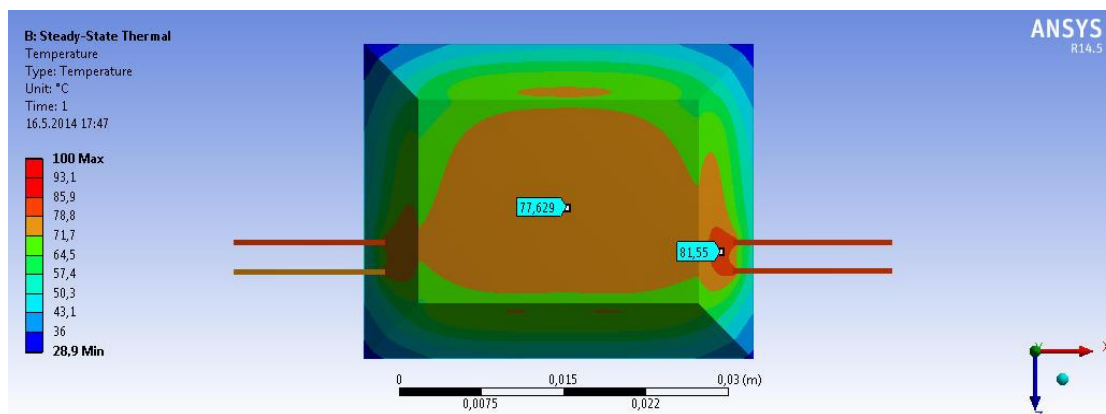
materiál	$\lambda \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
korundová keramika 96%	25
SAC305	58,7
vodivá pasta	10
odporová pasta	0,21
ocel	60,5
polyamid	0,39
polytetrafluorethylen (PTFE)	0,25
polyvinylchlorid (PVC)	0,16

Posledním krokem před zahájením samotné simulace je přesné definování okrajových podmínek. Všechny simulace jsou provedeny za stejných okrajových podmínek:

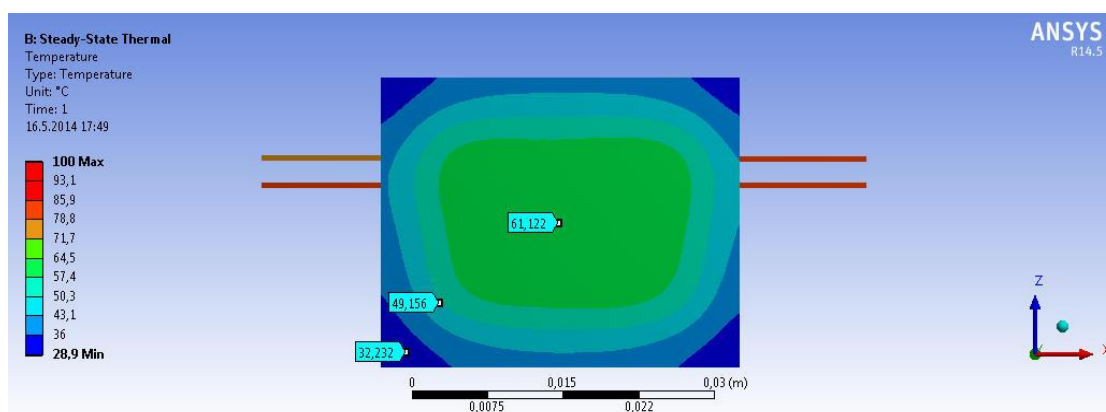
- Teplota okolí 20 °C
- Teplota generovaná meandrem je nastavena na 100 °C
- Koeficient přestupu tepla byl nastaven pro horní plochu pouzdra $\alpha_1 = 36,22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, pro spodní plochu je $\alpha_2 = 81,77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a pro vertikální stěny je $\alpha_3 = 18,45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- Emisivita materiálu je stejně jako u termokamery nastavena na 0,9
- Teplotní vodivosti byly přiřazeny dle tabulky 11

7.2.1 Vyhodnocení teplotní analýzy pro meandr_1

Polyamid:



Obrázek 23 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, horní pohled, polyamid



Obrázek 24 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, spodní pohled, polyamid

Zhodnocení výsledků:

- Teplota na horní straně pouzdra = 77,63 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 61,12 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 81,55 °C
- Minimální teplota = 28,88 °C

Porovnání:

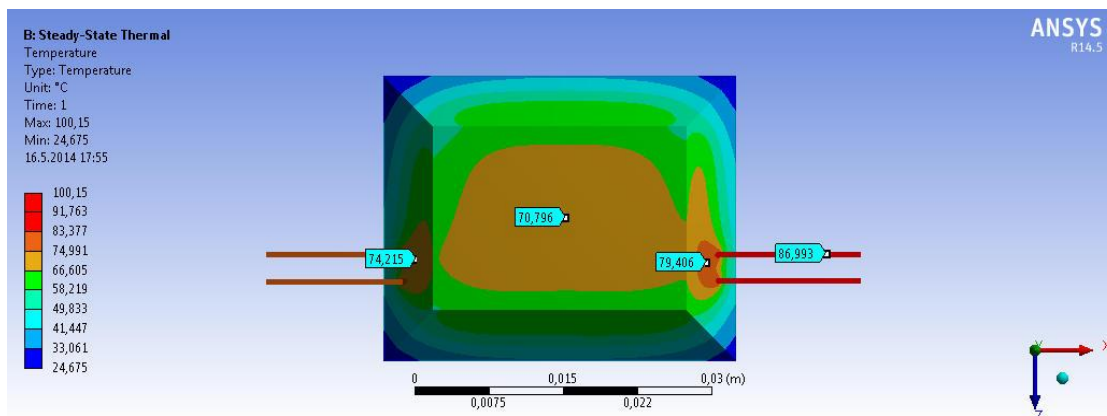
Tabulka 12 - Srovnání měření a simulací pro zapouzdřený meandr_1

MEANDR_1	termočlánek	termokamera	simulace
T _{HORNÍ}	81,44 °C	72,05 °C	77,63 °C
T _{SPODNÍ}	71,81 °C	-	61,12 °C

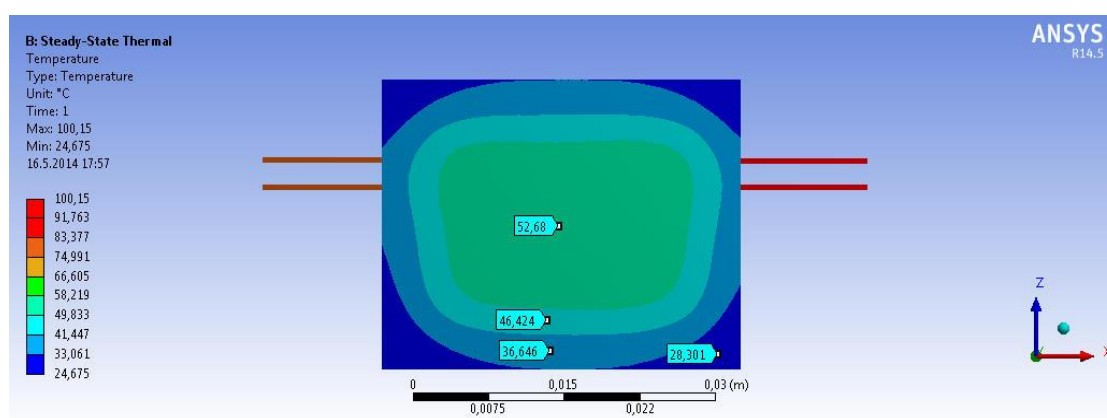
Shrnutí:

Výsledky simulace meandru_1 se odchylují od hodnot naměřených termokamerou o $\Delta T_k = 5,5$ °C a od reálných hodnot naměřených termočlánekem o $\Delta T_\varepsilon = 3,8$ °C.

Polytetrafluorethylen:



Obrázek 25 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, horní pohled, PTFE

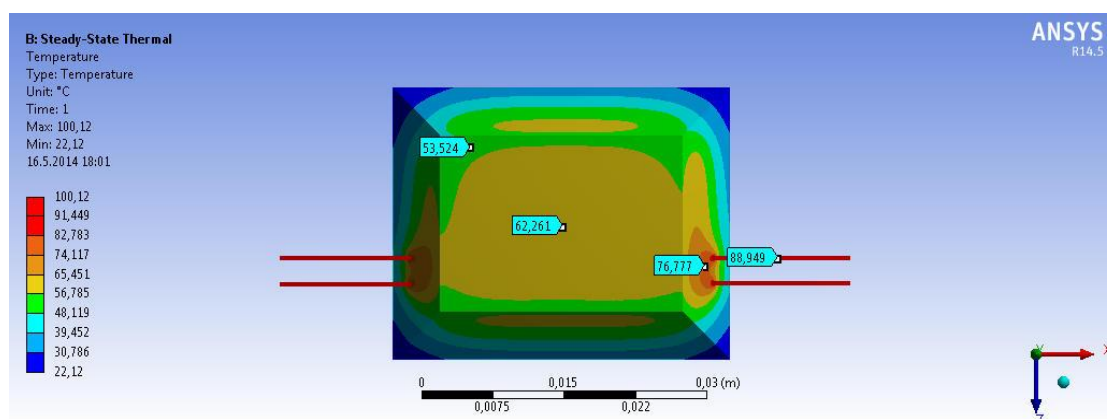


Obrázek 26 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, spodní pohled, PTFE

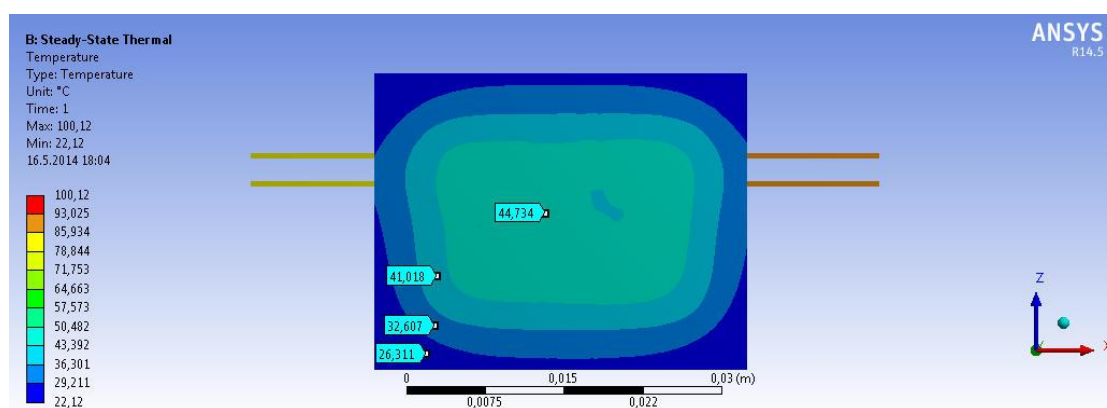
Zhodnocení výsledků:

- Teplota na horní straně pouzdra = 70,8 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 52,68 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 79,41 °C
- Minimální teplota = 24,68 °C

Polyvinylchlorid:



Obrázek 27 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, horní pohled, PVC



Obrázek 28 - Simulace teplotního rozložení meandru_1, spodní pohled, PVC

Zhodnocení výsledků:

- Teplota na horní straně pouzdra = 62,26 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 44,73 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 76,78 °C
- Minimální teplota = 22,12 °C

Porovnání:

Tabulka 13 - Srovnání hodnot pro různé pouzdríci hmoty meandru_1

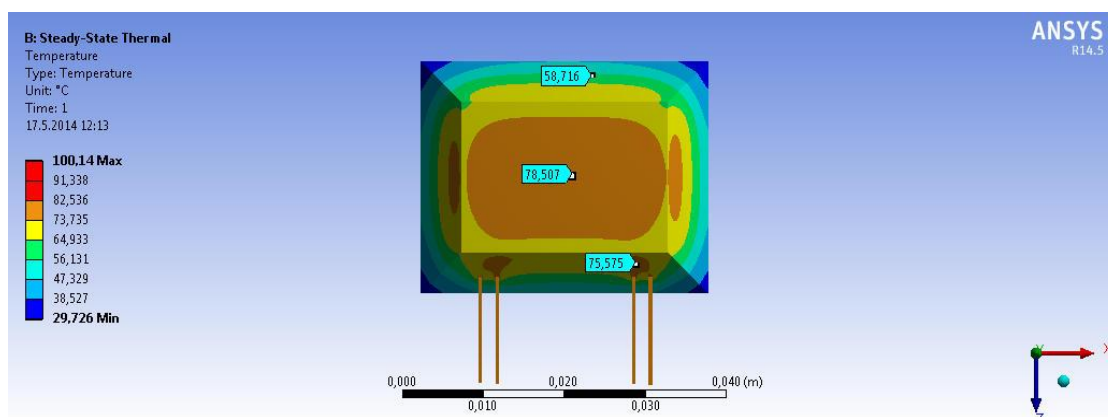
MEANDR_1	polyamid	PTFE	PVC
T_H	77,63 °C	70,8 °C	62,26 °C
T_S	61,12 °C	52,68 °C	44,73 °C

Shrnutí:

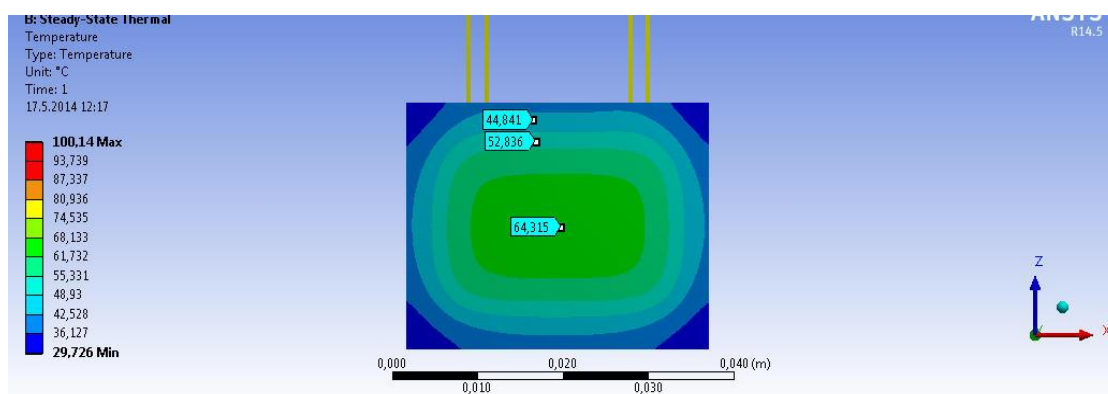
Výsledky předcházejících dvou simulací ukazují na skutečnost, že při použití pouzdríciho materiálu s nižší hodnotou tepelné vodivosti dochází k horšímu odvodu tepla od čipu, což je v případě pouzdrění polovodičových čipů a hybridních integrovaných obvodů nežádoucí.

7.2.2 Vyhodnocení teplotní analýzy pro meandr_2

Polyamid:



Obrázek 29 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, horní pohled, polyamid



Obrázek 30 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, spodní pohled, polyamid

Zhodnocení výsledků:

- Teplota na horní straně pouzdra = 78,51 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 64,32 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 75,58 °C
- Minimální teplota = 29,73 °C

Porovnání:

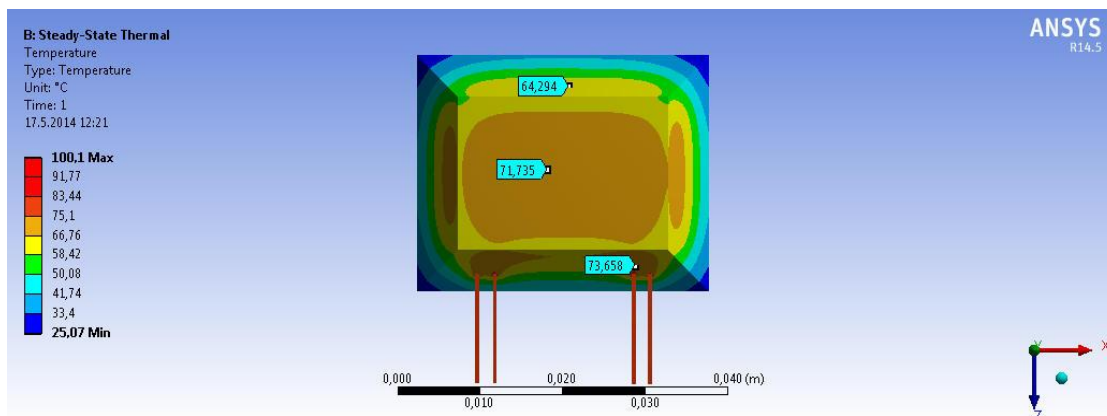
Tabulka 14 - Srovnání měření a simulací pro zapouzdřený meandr_2

MEANDR_2	termočlánek	termokamera	simulace
T_H	64,29 °C	74,4 °C	78,51
T_S	77,64 °C	-	64,32

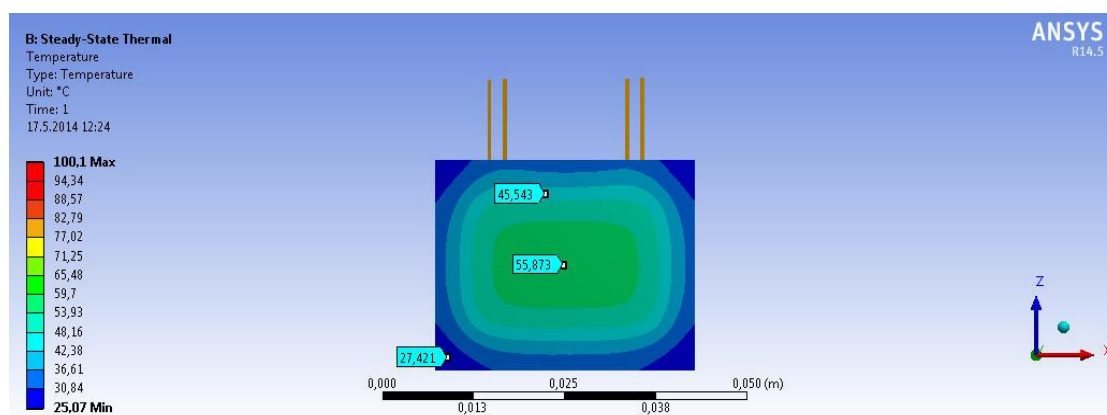
Shrnutí:

Výsledky simulace meandru_2 se odchyľují od hodnot naměřených termokamerou o $\Delta T_k = 4,1$ °C a od hodnot naměřených termočlánekem o $\Delta T_c = 14,2$ °C.

Polytetrafluorethylen:



Obrázek 31 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, horní pohled, PTFE

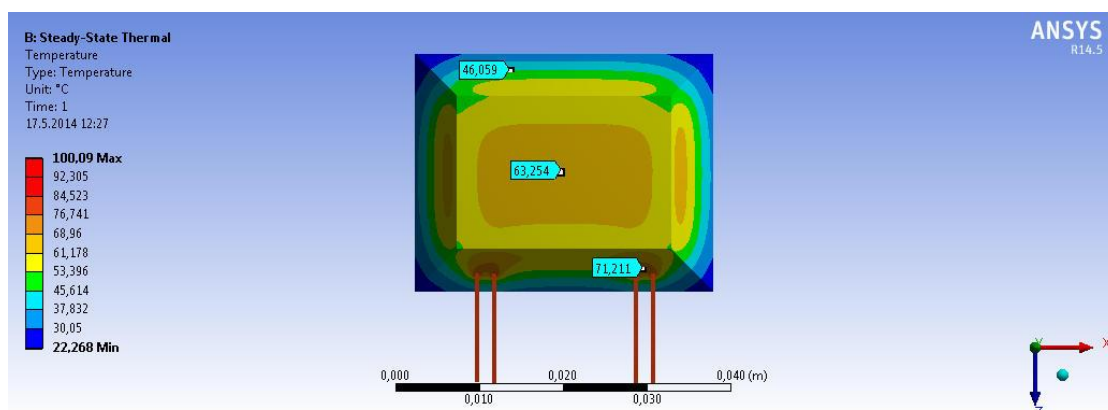


Obrázek 32 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, spodní pohled, PTFE

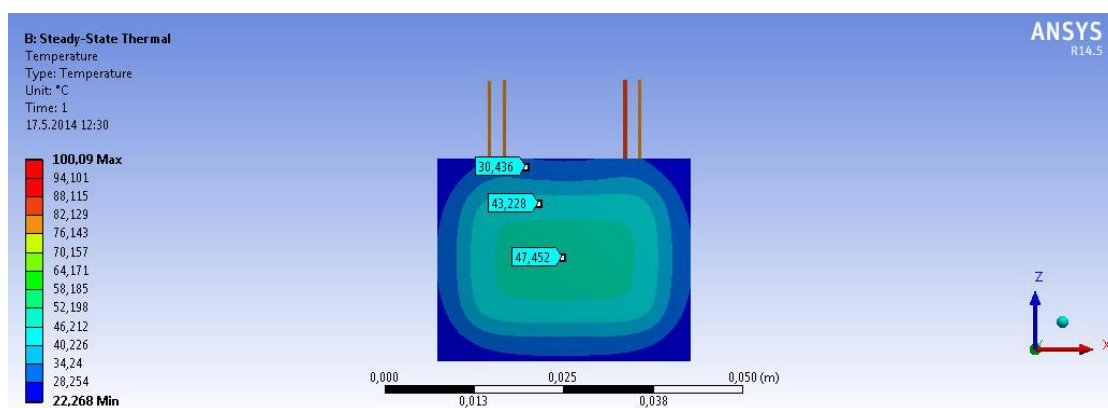
Zhodnocení výsledků:

- Teplota na horní straně pouzdra = 71,74 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 55,87 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 73,66 °C
- Minimální teplota = 25,07 °C

Polyvinylchlorid:



Obrázek 33 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, horní pohled, PVC



Obrázek 34 - Simulace teplotního rozložení meandru_2, spodní pohled, PVC

Zhodnocení výsledků:

- Teplota na horní straně pouzdra = 63,25 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 47,45 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 71,21 °C
- Minimální teplota = 22,27 °C

Porovnání:

Tabulka 15 - Srovnání hodnot pro různé pouzdríci hmoty meandru_2

MEANDR_2	polyamid	PTFE	PVC
T_H	78,51 °C	71,74 °C	63,25 °C
T_S	64,32 °C	55,87 °C	47,45 °C

Shrnutí:

Výsledky posledních dvou simulací opět ukazují na skutečnost, že při použití pouzdríciho materiálu s nižší hodnotou tepelné vodivosti dochází k horšímu odvodu tepla od čipu, což je v případě pouzdrění polovodičových čipů a hybridních integrovaných obvodů nežádoucí.

8 Shrnutí výsledků

Následující tabulky slouží k celkovému shrnutí všech dat, která byla získána simulacemi, měřením pomocí termokamery a termočlánu.

8.1 Tabulkové srovnání teplot

		meandr_1	meandr_2
Termočlánek	T _S	71,81 °C	77,64 °C
	T _H	81,44 °C	64,29 °C
Termokamera	T _S	-	-
	T _H	72,05 °C	74,40 °C
Simulace	T _S	61,12 °C	64,32 °C
	T _H	77,63 °C	78,51 °C

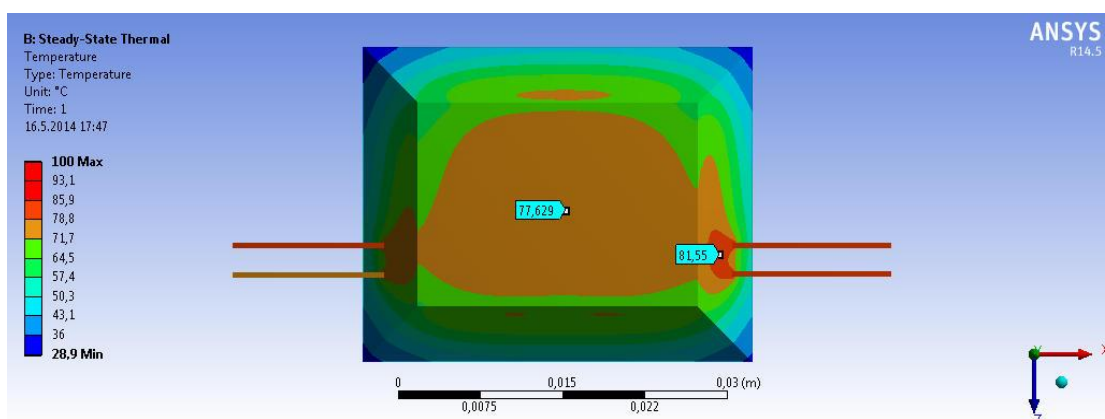
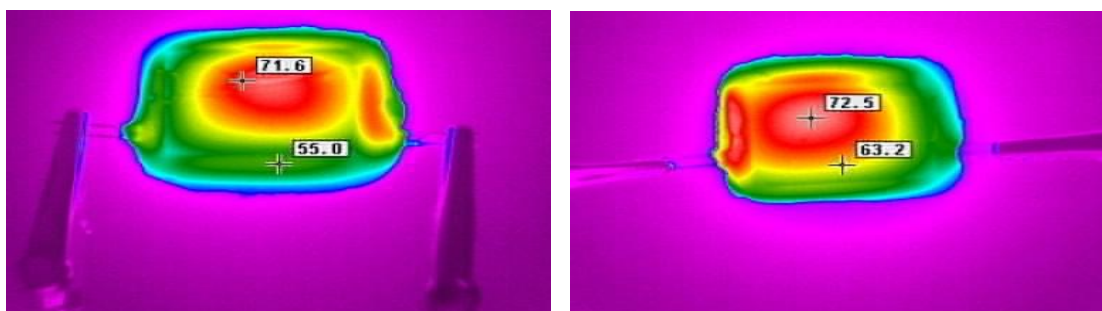
SIMULACE			meandr_1	meandr_2
	Polyamid ($\lambda=0,39$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	T _S	61,12 °C	64,32 °C
		T _H	77,63 °C	78,51 °C
		T _K	81,55 °C	75,58 °C
		T _{min}	28,88 °C	29,73 °C
	PTFE ($\lambda=0,25$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	T _S	52,68 °C	55,87 °C
		T _H	70,80 °C	71,74 °C
		T _K	79,41 °C	73,66 °C
		T _{min}	24,68 °C	25,07 °C
	PVC ($\lambda=0,16$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	T _S	44,73 °C	47,45 °C
		T _H	62,26 °C	63,25 °C
		T _K	76,78 °C	71,21 °C
		T _{min}	22,12 °C	22,27 °C

T_K – teplota v okolí kontaktů

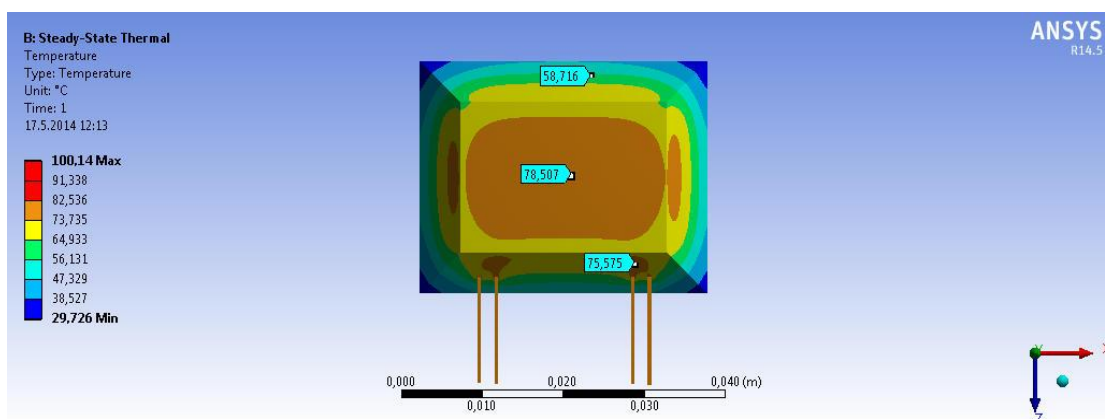
T_{min} – minimální teplota pouzdra

8.2 Grafické srovnání rozložení tepla

Srovnání rozložení tepla pro meandr_1, horní snímky jsou pořízené termokamerou, spodní je výsledek simulace:



Srovnání rozložení tepla pro meandr_2, horní jsou snímky pořízené termokamerou, spodní je výsledek simulace:



8.3 Porovnání simulací a měření

Z výsledků, které byly získány měřením termočlánky, nelze v mnoha případech sledovat jasný trend změn teplot. Při získávání výsledků se vyskytovaly systematické i nahodilé chyby měření.

Simulační modely byly vytvářeny s velkou přesností a okrajové podmínky byly u srovnatelných verzí totožné. Z tohoto důvodu jsou provedená měření považována za orientační a pro vyhodnocení bude použito výsledků, získaných simulacemi. Ty mohou při správném nastavení určit trend změny teplot s vyšší přesností a bez nahodilých a systematických chyb, které se při běžné výrobě vyskytují.

Grafické zobrazení rozložení tepla měřené termokamerou se téměř shodovalo s rozložením tepla simulovaného modelu, viz grafické zhodnocení měřených výsledků.

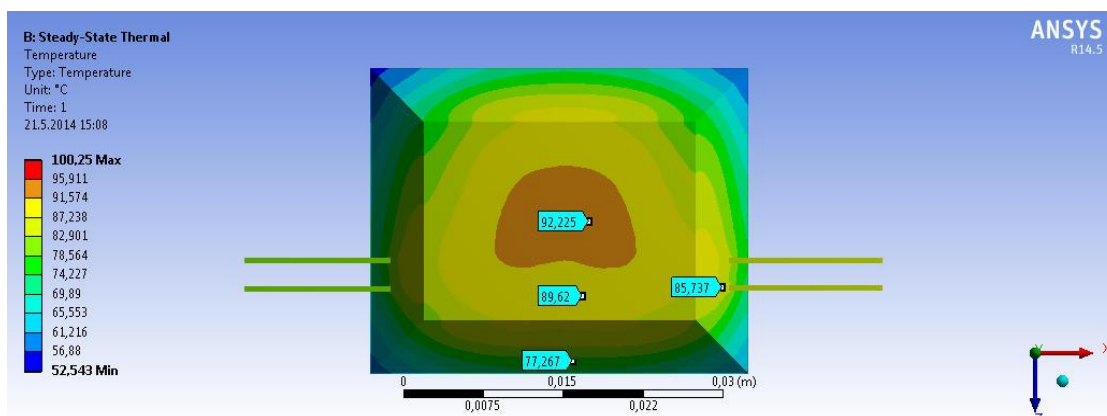
9 Návrh vylepšení

Ze shrnutí výsledků vyplynulo, že materiály s menší tepelnou vodivostí odvádí méně tepla od čipu a dochází tak k horšímu ochlazování systému. Proto by měl návrh vylepšení zahrnovat termoplastový materiál s tepelnou vodivostí vyšší než dostupný polyamidový pouzdrící materiál.

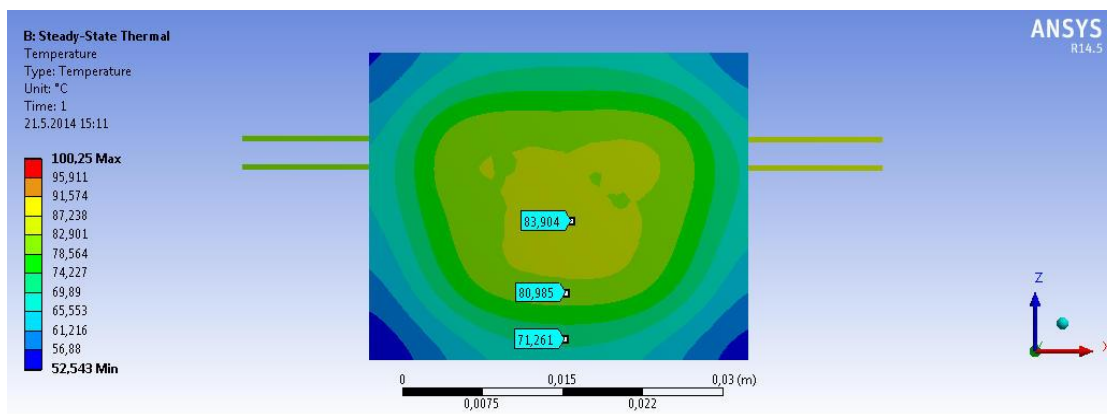
Lepších výsledků bylo dosaženo použitím tepelně vodivého pouzdrícího materiálu na bázi polyfenylsulfidu (PPS) s tepelnou vodivostí $\lambda = 1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ firmy Cool Polymers® s označením Coolpoly® D5110, dle zdroje [10].

Polyfenylsulfid:

1) meandr_1



Obrázek 35 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_1, horní pohled, PPS



Obrázek 36 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_1, spodní pohled, PPS

Zhodnocení výsledků meandru_1:

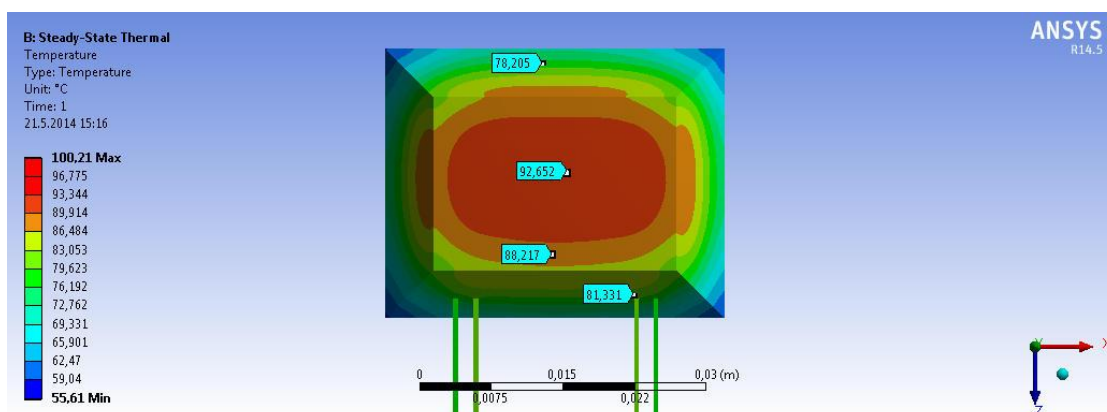
- Teplota na horní straně pouzdra = 92,23 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 83,90 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 85,74 °C
- Minimální teplota = 52,54 °C

Porovnání:

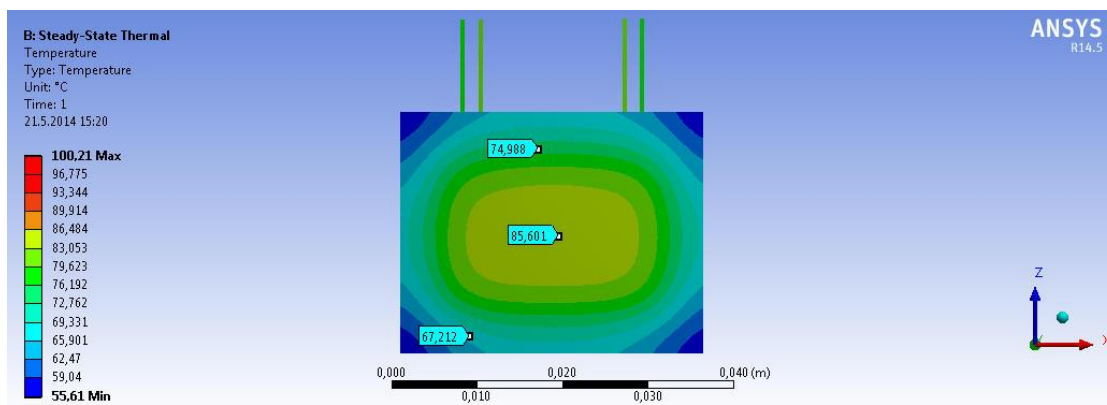
Tabulka 16 - Srovnání teplot pouzdrů s návrhem vylepšení pro meandr_1

MEANDR_1	polyamid	PTFE	PVC	PPS
T_H	77,63 °C	70,8 °C	62,26 °C	92,23 °C
T_S	61,12 °C	52,68 °C	44,73 °C	83,90 °C

2) meandr_2



Obrázek 37 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_2, horní pohled, PPS



Obrázek 38 - Vylepšené teplotní rozložení meandru_2, spodní pohled, PPS

Zhodnocení výsledků meandru_2:

- Teplota na horní straně pouzdra = 92,65 °C
- Teplota na spodní straně pouzdra = 85,60 °C
- Teplota v okolí kontaktů = 81,31 °C
- Minimální teplota = 55,61 °C

Porovnání:

Tabulka 17 - Srovnání teplot pouzdrů hmot s návrhem vylepšení pro meandr_2

MEANDR_2	polyamid	PTFE	PVC	PPS
T_H	78,51 °C	71,74 °C	63,25 °C	92,65 °C
T_S	64,32 °C	55,87 °C	47,45 °C	85,60 °C

Použitím pouzdrů hmoty s vyšší tepelnou vodivostí se dosáhlo lepšího odvodu tepla od čipu do prostoru, tím pádem účinnějšího chlazení.

10 Závěr

První část práce je věnována teoretickému přehledu. V první a druhé kapitole jsou popsány hlavní funkce a základní rozdělení pouzder na základě definování používaných materiálů a jejich vlastností pro jednotlivé typy pouzder.

V následující kapitole byl navržen ideální postup při výběru pouzdřicího materiálu a byl sestaven diagram pro usnadnění správného postupu výběru.

Ve čtvrté kapitole byly rozebrány faktory ovlivňující návrh pouzdra, tedy vlastnosti, které musí elektrotechnický inženýr uvažovat při návrhu. Tyto vlastnosti jsou rozděleny na mechanické (M), elektrické (E), tepelné (T), chemické (CH) a další. Jsou zde uvedeny tabulky s typickými hodnotami některých vlastností.

Pátá kapitola práce se zabývala rozbořem fyzikální podstaty šíření tepla v různých prostředích. Tedy kondukcí, konvekcí, radiací a definováním důležitých vztahů, nutných pro uskutečnění simulace.

Druhá část práce má experimentální charakter, jehož cílem je především ověření tepelných vlastností navrženého pouzdra. Je proveden návrh topného meandru, jenž sloužil jako zdroj tepla místo polovodičového čipu. Dále je provedeno zapouzdrění meandru pomocí pneumatické pouzdřicí hlavice a následně jsou ověřovány vlastnosti na základě měření teplot termočlánkem před a po zapouzdrění meandru. Naměřené hodnoty se potom použily jako okrajové podmínky simulace v programu ANSYS® Workbench™.

Dále byly vytvořeny simulační modely navržených struktur a následně byly provedeny simulace za daných okrajových podmínek. Simulace byly provedeny pro více pouzdřicích hmot pro srovnání výsledků tepelné vodivosti a rozložení tepla na povrchu pouzdra.

Pro porovnání rozložení tepla vzorku se simulacemi bylo tepelné rozložení přeměřeno termokamerou. Podmínky měření byly nastaveny tak, aby meandr vytápěl na 100 °C. Grafické srovnání výsledků ukázalo dobrou shodu rozložení tepla realizovaných vzorků a simulací.

Experimentální část práce ukázala, že stěžejní pro získání věrohodných výsledků je správné provedení simulací. Proto bylo ověření správnosti výsledků získané simulacemi provedeno na základě dvou různých způsobů měření. Při prvním měření byly teploty zjišťovány termočlánkem a druhé měření využívalo termokamery. Výsledky získané měřením byly v obou případech zatíženy chybou, která byla dána odchylkami jak při výrobě, tak při měření testovacích vzorků.

Mezi odchylky vzniklé při výrobě patří např. různé umístění meandru v pouzdře, jelikož nakonec nebyla použita kovová forma, která by jasně definovala umístění meandru. Jednotlivé vzorky se v tomto ohledu mohou nepatrně odlišovat.

Měření testovacích vzorků ovlivňovala volná konvekce vzduchu v laboratoři, dále nucená konvekce vzduchu z chladičů laboratorních zařízení. U měření termočlánkem to bylo neideální uchycení sondy termočlánku na pouzdře, resp. substrátu. Z tohoto důvodu bylo měření bráno spíše jako orientační. Směrodatnější význam měly výsledky simulací. V kapitole 8 byly shrnuty všechny dosažené výsledky numericky i graficky.

Jako poslední výstup z této práce bylo navrženo vylepšení odvodu tepla od čipu použitím pouzdřicí hmoty na bázi termoplastu s vyšší hodnotou tepelné vodivosti.

Seznam zkratek

ASTM	americká organizace pro testování a materiály = American Society for Testing and Materials
BGA	povrchově montované pouzdro s vývody ve tvaru kuliček na spodní straně = Ball Grid Array
CBGA	keramické BGA
CRT	katodová trubice = Cathode Ray Tube
CSR	ocel válcovaná za studena = Cold Rolled Steel
CTE	koeficient teplotní roztažnosti = Coefficient of Thermal Expansion
DIL	pouzdro s vývody po obou stranách = Dual In Line package
DPS	deska s plošnými spoji
IO	integrovaný obvod
MIL-STD	vojenský standard Spojených států amerických = United States military standard
MMC	kovový matricový kompozit = Metal Matrix Composite
MP	bod tání = Melting Point
NHP	téměř hermetické pouzdro = Near Hermetic Package
PBGA	plastové BGA
PTFE	polytetrafluorethylen
PVC	polyvinylchlorid
T _g	teplota skelného přechodu = glass temperature
TI	tixotropní index
TO	pouzdro pro tranzistor = Transistor Outline package

Použitá literatura a další zdroje

- [1] EPO-TEK. Epoxy technology [online]. 2013 - 2014 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/>
- [2] GANČEV, J. Perspektivní materiály pro pouzdření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 24 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [3] GILLES, Ken. Packaging materials: Time to consider thermoplastic materials for electronic packaging [online]. [cit. 15.11.2013]. Dostupné z: http://www.et-trends.com/files/Thermoplastics_for_Packaging.pdf
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [5] JAMNIA, Ali. Practical guide to the packaging of electronics: thermal and mechanical design and analysis. New York: Marcel Dekker, c2003, ix, 202 p. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 146. ISBN 08-247-0865-2.
- [6] KUTZ, Myer. Handbook of materials selection: Materials in electronic packaging [online]. New York: John Wiley, 2002 [cit. 2013-11-18]. ISBN 0-471-35924-6.
- [7] LICARI, James J. Coating materials for electronic applications: polymers, processes, reliability, testing [online]. Norwich: William Andrew Publishing, 2003, 531 s. [cit. 2013-11-5]. ISBN 08-155-1492-1. Dostupné z: <http://kuc.cz/f869lq>
- [8] Materials Issues in Area-Array Microelectronic Packaging. In: TMS.org [online]. 1999 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9903/Frear-9903.html>
- [9] Moore's law. In: Wikipedia [online]. 25.11.2013 [cit. 2013-10-8]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law
- [10] Online Materials Information Resource - MatWeb [online]. 1996 - 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.matweb.com>
- [11] PECHT, Michael G, Rakesh AGARWAL, Patrick MCCLUSKEY, Terrance DISHONGH, Sirus JAVADPOUR a Rahul MAHAJAN. Electronic packaging: Materials and their properties. Boca Raton: CRC Press, c1999, 114 s. ISBN 978-084939625-0.
- [12] Polymer Systems Technology Limited. Silicones and Silicone Rubber Supplier [online]. 2013 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.silicone-polymers.co.uk/>
- [13] PSOTA, Boleslav. Modelování termodynamických senzorů. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Michal Řezníček.
- [14] SCHENK, David. Optimalizace desky plošného spoje pro výkonovou LED. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Josef Vochýán, Ph.D.
- [15] SiliconFarEast [online]. 2000-2013 [cit. 2013-11-27]. Dostupné z: <http://www.siliconfareast.com/>
- [16] SUN, Wei-Che, Heng-Chieh CHIEN, Mei-Jiau HUANG, Tien-Yao CHANG a Da-Jeng YAO. A novel method for measuring thick film thermal conductivity [online]. 2010[cit. 2014-05-18]. Dostupné:

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5592572&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5592572

- [17] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Vyd. 1. Brno: VUTUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [18] SZENDIUCH, Ivan. Pouzdření polovodičových čipů - základ moderního hardwaru. [online]. 2010, č. 11 [cit. 2013-10-10]. Dostupné z: www.stech.cz/download.php?id_document=401159474&at=1
- [19] Thick-film Heaters Made from Dielectric-coated Stainless-steel Substrates. ESL ElectroScience - Thick-Film Materials & Ceramic Tapes [online]. 2012 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/heaterappnotes.html>
- [20] ZHAO, Jin. Electrical Requirements of Electronic Packaging. 2006. Dostupné z: <http://www.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/engr242/Electrical%20Requirements%20of%20Electronic%20Packaging.pdf>

Přílohy

Tabulka 18 - Fyzikální charakteristiky vzduchu v závislosti na teplotě při konstantním tlaku 100 kPa dle [14]

t [°C]	ρ [kg·m ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	$\lambda \cdot 10^{-2}$ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	$a \cdot 10^{-6}$ [m ² ·s ⁻¹]	$\eta \cdot 10^{-6}$ [Pa·s]	$\nu \cdot 10^{-6}$ [m ² ·s ⁻¹]	β [10 ⁻³ ·K ⁻¹]
-50	1,561	1013	2,04	12,90	14,6	9,35	-
-20	1,376	1009	2,26	16,28	16,3	11,85	3,962
0	1,275	1005	2,37	18,50	17,2	13,49	3,671
20	1,188	1010	2,52	21,00	18,2	15,32	3,419
40	1,112	1013	2,65	23,53	19,2	17,27	3,200
60	1,046	1017	2,80	26,32	20,1	19,22	3,007
80	0,986	1020	2,93	29,13	21,0	21,30	2,836
100	0,934	1022	3,07	32,16	21,8	23,34	2,684
120	0,886	1024	3,20	35,27	22,8	25,73	-
140	0,843	1027	3,33	38,46	23,5	27,88	-
160	0,804	1030	3,44	41,54	24,1	29,98	-

t – teplota

ν - kinematická viskozita

η - dynamická viskozita

c - měrná tepelná kapacita

ρ - hustota

β - koeficient objemové teplotní roztažnosti

a - součinitel teplotní vodivosti

λ - tepelná vodivost